

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Кафедра геології та екології

Тема роботи

“ Дослідження ефективності та негативного впливу на довкілля
геоінженерної технології розпилення аерозолів у стратосфері для зменшення
інтенсивності глобального потепління.”

Виконав

Магістрант групи ЕО-23м

Науковий керівник

Нормоконтролер

В. о. завідувача кафедри

Єгор ДУБНЯК

Анатолій БОНДАРЕНКО

Олександр ТРУНІН

Світлана ПАНОВА

Кривий Ріг

2024

Зміст

РЕФЕРАТ	1
Вступ	3
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ.....	5
1.1 Причини та наслідки глобального потепління.....	5
1.2 Методи геоінженерії для боротьби зі змінами клімату	9
1.3 Розпилення аерозолів у стратосфері як технологія кліматичної інтервенції	17
1.4 Теоретичне обґрунтування впливів аерозолів на відбивну здатність атмосфери.....	24
1.5 Фактори що впливають на ефективність розпилення аерозолів.....	27
1.6 Результати моделювання зниження температури в наслідок розпилення аерозолів.....	33
2.ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	36
2.1 Потенціальний вплив на екосистеми на здоров'я людини.....	36
2.2 Рекомендації альтернативного підходу у геоінженерії	41
2.3 Можливі довгострокові наслідки для кліматичних систем	46
3.СОЦІАЛЬНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ГЕОІНЖИНЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	50
3.1 Міграція населення та соціальні конфлікти	50
3.2 Економічні витрати на адаптацію.....	52
3.3 Відношення суспільства до геоінженерії та етичні питання	56
Список Літератури	61

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна (магістерська) робота 67с., 12мал., 10 табл. 34 літературних джерела

У контексті глобальних змін клімату та постійного підвищення температури на планеті з'являється потреба в ефективних методах зниження темпів глобального потепління. Одним із таких методів є геоінженерія — наука, яка вивчає можливість навмисного втручання в природні процеси планети з метою зменшення впливу антропогенних факторів на клімат. Одним з найперспективніших підходів є технологія розпилення аерозолів у стратосфері, яка передбачає введення дрібнодисперсних часток у верхні шари атмосфери для зменшення інтенсивності глобального потепління.

Метою цієї дипломної роботи є дослідження ефективності технології розпилення аерозолів у стратосфері для зниження глобальної температури та вивчення її потенційних негативних впливів на довкілля. В рамках дослідження буде здійснено огляд основних концепцій геоінженерії, зокрема, технології розпилення аерозолів, а також оцінка можливих екологічних, соціальних та етичних наслідків її застосування.

Однією з головних причин, чому технологія розпилення аерозолів привертає увагу науковців і політиків, є її потенціал для значного зменшення глобальної температури. Цей метод передбачає введення в стратосферу часток, таких як сірчисті аерозолі, які здатні відбивати частину сонячного випромінювання, тим самим зменшуючи кількість тепла, що потрапляє на поверхню Землі. Результати чисельних моделей вказують на те, що розпилення аерозолів може призвести до охолодження клімату, що потенційно допоможе зменшити наслідки глобального потепління, такі як підвищення рівня моря або зміна кліматичних зон. Однак, незважаючи на ці потенційні переваги, технологія має значні ризики та викликає низку

екологічного занепокоєння. По-перше, є питання щодо впливу на озоновий шар, оскільки сірчисті аерозолі можуть сприяти його виснаженню, збільшуючи кількість ультрафіолетового випромінювання, яке досягає поверхні Землі. По-друге, розпилення аерозолів може викликати непередбачувані зміни в кліматичних умовах, які матимуть як негативні, так і позитивні наслідки для різних регіонів планети. Зокрема, такі зміни можуть вплинути на опади, сільськогосподарські врожаї та біологічного зноманіття.

Крім того, технологія розпилення аерозолів має низку соціальних і етичних питань. Оскільки ця технологія передбачає втручання в глобальні кліматичні процеси, постає питання про можливі наслідки для майбутніх поколінь, а також про роль людства в управлінні такими технологіями. Крім того, існує ризик, що країни, які застосовуватимуть геоінженерні методи, можуть порушити міжнародні угоди та спричинити геополітичну напругу через незбалансоване впливання на клімат в різних частинах світу.

Вивчення ефективності та можливих негативних наслідків технології розпилення аерозолів є важливим для подальшого розуміння того, чи варто застосовувати цей метод як один із інструментів боротьби з глобальним потеплінням. Під час дослідження буде розглянуто існуючі моделі та сценарії, проведено порівняння з іншими методами зниження температури, а також оцінено потенційні ризики для навколишнього середовища та суспільства. Загалом, це дослідження має на меті не лише оцінити ефективність технології розпилення аерозолів, але й сприяти розробці більш обґрунтованих політик у галузі кліматичних змін та геоінженерії, а також підвищити усвідомленість про потенційні наслідки такої технології для довкілля та людства.

Ключові слова: глобальне потепління, геоінженерія, аерозолі, стратосфера, екологічний вплив, кліматичні зміни.

Вступ

Глобальне потепління є однією з найбільших екологічних та соціальних загроз сучасності. Невпинне підвищення середньої температури Землі викликає численні зміни в кліматичних умовах, що призводить до серйозних наслідків для біосфери, економіки та людства загалом. Зростання концентрації парникових газів у атмосфері, зокрема діоксиду вуглецю, метану та оксидів азоту, є основною причиною цих змін.

У зв'язку з цим, вивчення нових технологій, спрямованих на боротьбу з глобальним потеплінням, стало одним з пріоритетних напрямів наукових досліджень. Одним з таких рішень є геоінженерія — використання технологій для навмисного втручання в природні процеси планети з метою змінити кліматичні умови. Одним із методів геоінженерії, що привертає особливу увагу, є технологія розпилення аерозолів у стратосфері, яка передбачає введення дрібнодисперсних часток у верхні шари атмосфери з метою віддзеркалення сонячного випромінювання та охолодження клімату Землі. Проте, попри обіцянки щодо потенційного зменшення інтенсивності глобального потепління, технологія розпилення аерозолів викликає численні занепокоєння з точки зору екологічних і соціальних наслідків. Це питання вимагає детального аналізу щодо можливих негативних наслідків для довкілля та людства, а також оцінки її ефективності в контексті глобальних кліматичних змін.

Метою цієї дипломної роботи є дослідження ефективності геоінженерної технології розпилення аерозолів у стратосфері, а також вивчення її можливих негативних впливів на екосистеми та здоров'я людей. В рамках роботи буде проведено огляд сучасних наукових досліджень, аналіз існуючих моделей та сценаріїв застосування цієї технології, а також оцінка потенційних екологічних ризиків та етичних аспектів її використання.

Основними завданнями дослідження є оцінка можливих впливів аерозольного розпилення на зниження глобальної температури, вивчаючи результати чисельних моделей та експериментальних досліджень. Сформувавши рекомендації щодо подальших наукових досліджень та розробки політики щодо використання технології розпилення аерозолів в контексті глобального змінення клімату. Пропонувати шляхи мінімізації ризиків та максимізації потенційної ефективності даної технології.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ

1.1 Причини та наслідки глобального потепління

Глобальне потепління – це стійке підвищення середньої температури на Землі, що відбувається через антропогенні та природні фактори. Основні причини глобального потепління можна поділити на дві великі категорії:

1. *Антропогенні причини* - це фактори, викликані діяльністю людини, які є основним двигуном сучасного глобального потепління. Серед них:

Викиди парникових газів є однією з основних причин глобального потепління та зміни клімату. Цей процес починається зі спалювання викопного палива, такого як вугілля, нафта та природний газ, для отримання енергії, необхідної для роботи електростанцій, транспорту, промислових підприємств і домашніх господарств. Крім того, сільське господарство також сприяє виділенню парникових газів через діяльність, пов'язану з тваринництвом, вирощуванням культур і використанням добрив.

Вирубка лісів також відіграє значну роль, оскільки дерева, які поглинають вуглекислий газ, більше не виконують цю функцію. Звалища відходів є ще одним джерелом, оскільки в процесі розкладання органіки виділяються гази, які затримують тепло в атмосфері.[30,21]

Внаслідок накопичення цих газів у верхніх шарах атмосфери Земля поступово нагрівається, оскільки теплове випромінювання, яке зазвичай повертається в космос, затримується. Це нагрівання призводить до зміни кліматичних умов, танення льодовиків, підвищення рівня світового океану та зростання частоти екстремальних погодних явищ.

Щоб уповільнити ці процеси, необхідно впроваджувати відновлювані джерела енергії, розвивати енергоефективні технології та зменшувати споживання ресурсів. Важливим є також відновлення лісів, переробка

відходів і впровадження екологічно чистих методів у сільському господарстві та промисловості.[1,10]

Види парникових газів

- Діоксид вуглецю (CO_2): Виділяється через спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу) у промисловості, транспорті та енергетиці.
- Метан (CH_4): Викиди від сільського господарства (тваринництво, рисові поля) та видобутку газу й нафти.
- Закис азоту (N_2O): Надходить у атмосферу через використання хімічних добрив у сільському господарстві.



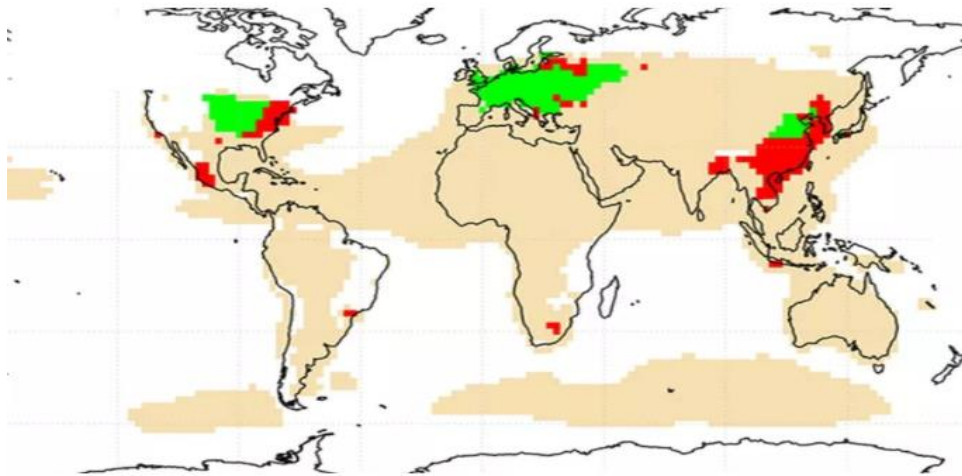
Малюнок 1.1 Глобальний річний розподіл викидів парникових газів за галузями, 2023р.

2. Природні причини

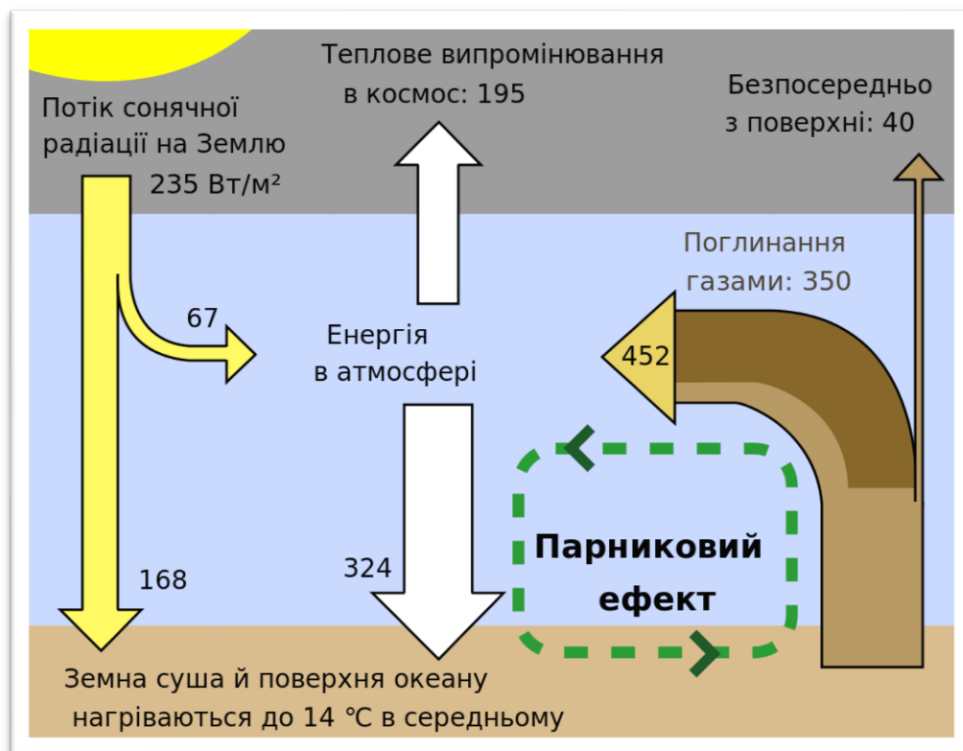
Глобальне потепління може бути спричинене не лише діяльністю людини, але й природними факторами, які впливають на клімат Землі. Одним із таких факторів є вулканічна активність. Під час виверження вулканів в атмосферу викидаються великі об'єми газів і частинок пилу, які здатні змінювати кліматичні умови. Деякі з цих речовин затримують тепло в атмосфері, сприяючи її нагріванню.

Сонячна активність також відіграє важливу роль у природному потеплінні. Зміни в інтенсивності сонячного випромінювання можуть впливати на кількість енергії, яка потрапляє на поверхню Землі, що впливає на середню температуру планети. Циклічні зміни в орбіті Землі та нахилі її осі, відомі як кліматичні цикли Міланковича, також можуть сприяти періодичному потеплінню. Ще одним природним чинником є зміни в океанічних течіях. Океани поглинають і розподіляють тепло по всій планеті. Зміни в циркуляції течій або температурі океанів можуть впливати на кліматичну систему, призводячи до тимчасового потепління.[15,17]

Крім того, існують процеси, пов'язані з природним розпадом органічних речовин у болотах і інших екосистемах, які можуть виділяти гази, здатні затримувати тепло в атмосфері. Усі ці процеси є частиною складної взаємодії природних систем, які впливали на клімат Землі задовго до появи людини.



Малюнок 1.1 Просторовий розподіл природних чинників (корич.) утворення пилу, індустриальних (черв.) та сільськогосподарських (зел.)антропогенних джерел



Малюнок 1.2 Схематичне зображення парникового ефекту

1.2 Методи геоінженерії для боротьби зі змінами клімату

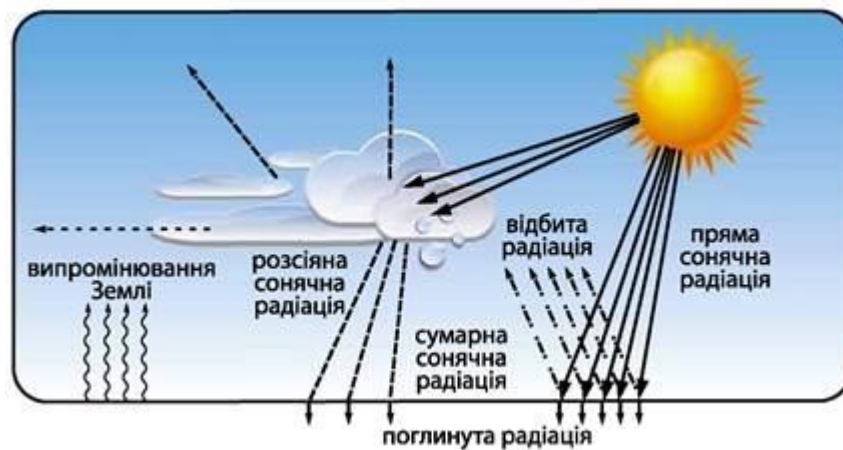
Геоінженерія — це набір технологій і методів, що спрямовані на активне втручання в природні процеси Землі з метою модифікації клімату або навколишнього середовища для зменшення негативних наслідків зміни клімату. Ці технології поділяються на дві основні категорії: управління сонячною радіацією (SRM) і зниження концентрації парникових газів (CDR).

Методи управління сонячною радіацією (SRM)

Методи управління сонячною радіацією (SRM) є однією з основних категорій геоінженерії, які спрямовані на зменшення кількості сонячного світла, що потрапляє на Землю, з метою охолодження клімату і пом'якшення наслідків глобального потепління. В основі таких технологій лежить ідея відбиття частини сонячної енергії назад у космос або зміни того, як сонячне тепло взаємодіє з атмосферою та поверхнею Землі. Оскільки цей метод безпосередньо впливає на кількість сонячного випромінювання, що досягає планети, він може мати швидкий ефект на глобальну температуру, однак в той же час існують великі невизначеності та ризики, пов'язані з його використанням.[23,4]

Однією з найвідоміших технологій управління сонячною радіацією є розпилення аерозолів у стратосфері, що має багато спільного з природним процесом, який відбувається після великих вулканічних вивержень. Під час таких вивержень в атмосферу викидаються великі обсяги аерозолів (наприклад, сірчаних часток), які блокують частину сонячного світла та призводять до тимчасового зниження температури на планеті. Ідея цього методу полягає в тому, щоб штучно створити подібний ефект, розпилюючи аерозолі або інші матеріали у верхніх шарах атмосфери, де вони можуть відбивати частину сонячного випромінювання, що потрапляє на Землю.

Потенційною перевагою цього методу є його швидкий ефект. Якщо такі технології будуть застосовані, вони можуть миттєво знизити глобальну температуру. Це може стати важливим інструментом для зменшення наслідків різких змін клімату, таких як екстремальні температури або посухи. Проте один із найбільших ризиків полягає в тому, що цей метод не вирішує основної проблеми — зменшення концентрації парникових газів в атмосфері, зокрема CO₂. Це означає, що викиди парникових газів продовжують накопичуватися в атмосфері, а температура може різко піднятися, якщо припинити застосування таких технологій.[32,20]



Малюнок 1.3 ілюстрація методу

Інший метод, пов'язаний з управлінням сонячною радіацією, це збільшення альбедо — здатності поверхні Землі відбивати сонячне світло. Альбедо Землі визначається співвідношенням відбитого світла до загального обсягу сонячного випромінювання, що потрапляє на планету. У певних регіонах, де поверхня має низьке альбедо, наприклад в пустелях або океанах, можна підвищити відбиття сонячного світла за допомогою спеціальних матеріалів або покриттів. Це може включати покриття великих площ землі білими або світлими матеріалами, що дозволяє зменшити поглинання тепла. Ось чому така технологія потенційно може бути використана в містах або на великих територіях, таких як пустелі.[34,7]

Збільшення альbedo може бути не тільки відносно дешевим і простим методом, але й реалізованим на локальних рівнях, що дозволяє запуснути проект без необхідності великих інвестицій у глобальні системи. Однак цей метод має свої обмеження. Наприклад, він може бути ефективним лише на обмежених територіях і може мати лише локальний ефект, не забезпечуючи значних змін на глобальному рівні. Крім того, підвищення відбиття сонячного світла в одних районах може призвести до непередбачуваних змін клімату в інших частинах світу, наприклад, зміни в режимах опадів або температури.[16,18]

Ще одним методом є освітлення океанів для збільшення їх альbedo. Це передбачає введення спеціальних мікроскопічних часток або матеріалів, які б підвищили здатність океанів відбивати сонячне світло, а не поглинати його. Оскільки океани поглинають величезну кількість тепла, зміна їх альbedo може мати значний ефект на клімат. Однак цей метод потребує масштабних інвестицій і має високий рівень невизначеності щодо його довгострокових екологічних наслідків для морських екосистем.

Одним з останніх розглянутих методів SRM є зміна хмарності. Теоретично, цей метод полягає в тому, щоб штучно збільшити кількість або альbedo хмар, щоб вони відбивали більше сонячного світла. Це можна досягти шляхом введення певних аерозолів в атмосферу, які сприяють формуванню більш світлих або щільних хмар. Якщо цей метод буде успішно застосований, він може мати ефект на зниження температури на планеті. Однак також існує ризик того, що такі зміни в хмарності можуть призвести до змін у глобальних погодних режимах і, зокрема, до змін у режимі опадів, що може негативно позначитися на сільському господарстві та водних ресурсах.[15]

Попри те, що методи управління сонячною радіацією мають великий потенціал для швидкого охолодження планети, їх застосування викликає

багато побоювань через низку факторів. По-перше, ці технології не усувають основну причину глобального потепління — надлишок парникових газів в атмосфері. Це означає, що їх застосування є лише тимчасовим вирішенням і не замінює необхідності зменшення викидів CO₂ і інших парникових газів. По-друге, методи SRM можуть призвести до непередбачуваних побічних ефектів, таких як зміни в режимах опадів, вплив на біорізноманіття або навіть зміни у кліматичних умовах, які можуть бути важко прогнозованими.

Океанічне альbedo (освітлення океанів)

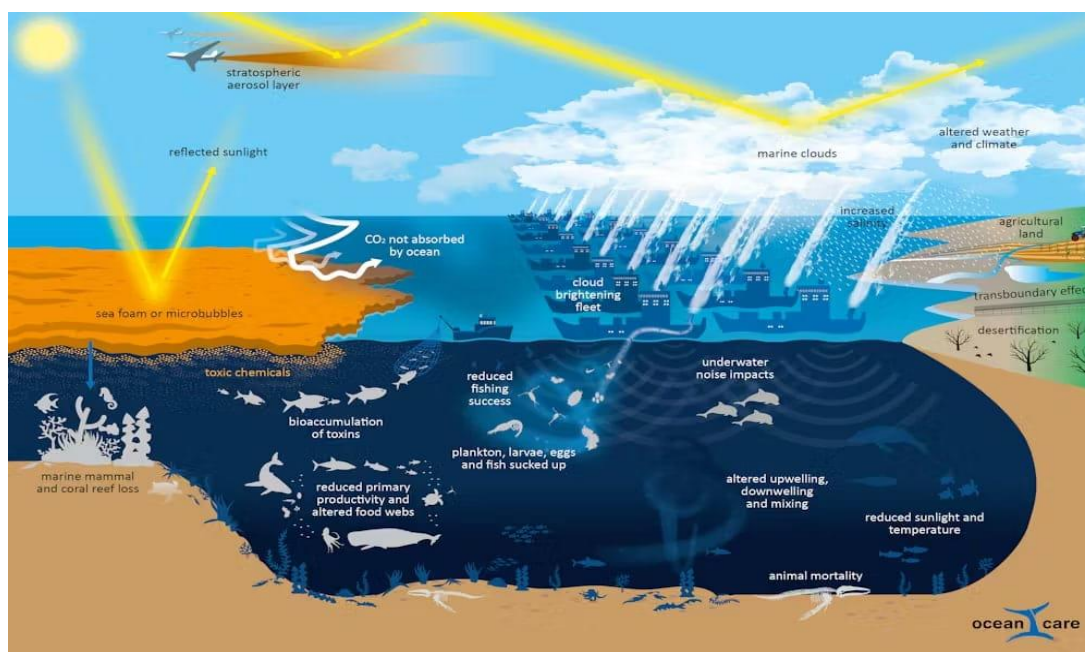
Океанічне альbedo є одним з методів управління сонячною радіацією, що спрямований на підвищення здатності океанів відбивати сонячне світло замість того, щоб поглинати його. Альbedo — це відношення відбитого світла до загальної кількості світла, яке потрапляє на поверхню. Океанічне альbedo можна збільшити за допомогою різних технологій, які сприяють зміні характеристик поверхні води, таким чином знижуючи кількість сонячної енергії, що поглинається океанами.[14,8]

Океани поглинають близько 70% сонячного світла, що потрапляє на Землю, і відіграють ключову роль у глобальному тепловому балансі. Підвищення альbedo океанів має на меті зменшити кількість тепла, яке океани поглинають, тим самим знижуючи глобальну температуру. Це можна досягти шляхом внесення в поверхневі шари океану певних матеріалів, що підвищують відображення сонячного світла.

Одним з підходів для реалізації цієї ідеї є розсіпання спеціальних матеріалів на поверхні океану. Ці матеріали можуть включати легкі, відбивні частки, такі як мікроскопічні кристали або інші відбивні речовини. Вони можуть розсіювати сонячне світло і тим самим знижувати поглинання тепла водою. Цей метод базується на принципі, подібному до розпилення аерозолів

у стратосфері, де матеріали змінюють характеристики поверхні і зменшують кількість поглиненого сонячного випромінювання.

Потенціал цього методу полягає в тому, що океани покривають понад 70% поверхні Землі, що робить навіть незначне збільшення їх альbedo на величезній площі здатним суттєво вплинути на глобальну температуру. Підвищення альbedo океану може допомогти зменшити ефект парникових газів, частково охолоджуючи планету.[19,17]



Малюнок 1.4 Ілюстрація методу 2

Однак незважаючи на його потенційні переваги, цей метод має низку ризиків і невизначеностей. Одним із головних викликів є екологічні наслідки таких втручань. Зміна властивостей поверхні океану може вплинути на морські екосистеми, особливо на морські організми, які залежать від конкретних умов освітлення та температури. Крім того, зміна альbedo океану може змінити погодні умови, зокрема вплинути на цикли опадів і навіть на глобальні атмосферні течії, що може мати непередбачувані наслідки.

Іншим потенційним обмеженням є технічна складність і висока вартість реалізації такого методу в глобальному масштабі. Розповсюдження

відбивних матеріалів на великих територіях океану вимагатиме значних ресурсів і технологічних рішень для того, щоб забезпечити рівномірний і тривалий ефект. Оскільки океанічне альbedo можна змінювати лише на поверхні води, ефект таких втручань може бути обмежений, а його стабільність — непередбачувана.

Ще однією проблемою є геополітичні аспекти застосування цієї технології. Оскільки океани є загальним надбанням всіх країн, існує питання щодо міжнародного регулювання таких заходів. Міжнародні організації повинні розробити правила та протоколи, щоб уникнути суперечок між країнами щодо того, як, де і коли можна проводити втручання в океанічну поверхню.

У цілому, океанічне альbedo може стати однією з потенційних стратегій боротьби зі змінами клімату, але, як і в інших методах управління сонячною радіацією, важливо проводити додаткові дослідження та оцінку довгострокових наслідків таких втручань. Потрібно ретельно прорахувати всі екологічні, соціальні та економічні наслідки, перш ніж застосовувати цей метод на глобальному рівні. Важливою частиною цього процесу має бути міжнародне співробітництво і обговорення етичних та екологічних питань, що виникають у зв'язку з використанням таких технологій.[1,6]

. Методи зниження концентрації парникових газів (CDR)

Методи зниження концентрації парникових газів (Carbon Dioxide Removal, CDR) є стратегіями геоінженерії, які спрямовані на безпосереднє видалення вуглекислого газу (CO₂) з атмосфери та зменшення його концентрації. На відміну від методів управління сонячною радіацією (SRM), які орієнтовані на тимчасове охолодження клімату шляхом зменшення потоку сонячної енергії на Землю, CDR прагнуть зменшити основну причину глобального потепління — надмірну кількість парникових газів в атмосфері.

Це довгострокова стратегія, яка допомагає зменшити рівень CO₂, що накопичується в атмосфері через викиди від людської діяльності, і може допомогти відновити природний кліматичний баланс.

Одним із основних підходів CDR є біологічні методи, зокрема лісонасадження та відновлення лісів. Ліси поглинають CO₂ з атмосфери через процес фотосинтезу, перетворюючи вуглекислий газ на органічну масу. Збільшення площ лісів або відновлення зрубаних лісових масивів може значно посилити цей природний процес поглинання вуглецю. Проте цей метод має обмеження, оскільки він залежить від доступних земельних ресурсів і може бути обмежений через конкуренцію з іншими потребами, такими як сільське господарство або забудова.[8,14]

Інший метод, що застосовує біологічні процеси, — це експансія морських екосистем. Наприклад, фермерство водоростей та місця вирощування морських рослин можуть допомогти поглинати CO₂. Морські водорості, зокрема, швидко ростуть і здатні поглинати значні кількості вуглецю під час свого життя. Після цього їх можна або переробляти в біоенергію з улавлюванням вуглецю (BECCS), або захороняти на дні океанів, що дозволяє "замкнути" вуглець на довгий період часу. Однак цей метод теж має свої складнощі, зокрема, пов'язані з можливими змінами в морських екосистемах і впливом на біорізноманіття.[12]

Існують також геологічні методи, які включають уловлювання та захоронення вуглецю (CCS). Цей процес передбачає захоплення CO₂, що викидається в атмосферу, і його транспортування в підземні геологічні формації, де газ може зберігатися на глибоких рівнях земної кори. Один з найбільш перспективних підходів — це захоронення CO₂ в порожніх нафтогазових резервуарах або підземних соляних печерах, що створюють природні умови для довготривалого зберігання газу. Попри високу ефективність цього методу, він також потребує значних фінансових вкладень

і має певні технічні ризики, пов'язані з безпекою транспортування та зберігання CO₂.

Іншою стратегією є мінералогічне виведення вуглецю, яке полягає в тому, щоб прискорити природний процес карбонатного вивітрювання, коли CO₂ реагує з мінералами, утворюючи стабільні карбонати. Це можна досягти шляхом поширення природних мінералів, таких як олівін, на великі площі земної поверхні, де вони можуть активно взаємодіяти з CO₂ в атмосфері. Такий процес може зайняти десятки чи навіть сотні років, але він забезпечує довгострокове і стабільне захоронення вуглецю без значних ризиків для екосистем.[9,16]

Вуглецевий улов з біомаси також є важливим методом. Цей підхід включає вирощування рослин (наприклад, дерев, бамбука чи трав) на землі, яка не використовується для сільськогосподарських потреб, а потім вилучення CO₂, що зберігається в біомасі, за допомогою технологій, таких як біоенергетика з уловлюванням вуглецю (BECCS). У цьому випадку біомаса спалюється для отримання енергії, а викиди CO₂ захоплюються та зберігаються, що дозволяє створити "негативні викиди" і зменшити концентрацію вуглецю в атмосфері.

Методи, що базуються на використанні сільськогосподарських методів для зниження викидів CO₂, також включають впровадження практик, які зберігають вуглець у ґрунті, таких як компостування або виправлення ґрунтової структури для підвищення її здатності зберігати вуглець. Наприклад, методи, які зменшують оранку або використовують покриття ґрунту, можуть збільшити кількість вуглецю, який залишається захороненим у ґрунті, зменшуючи його викид в атмосферу.

І, на завершення, можна згадати генетичні модифікації рослин, які сприяють більш ефективному поглинанню CO₂. Створення генетично

змінених видів, які поглинають більше вуглецю або мають більшу біомасу, може допомогти збільшити ефективність процесів фотосинтезу і зберігання вуглецю в біомасі.[10,11]

Проте важливо розуміти, що хоча ці методи можуть бути ефективними для зменшення рівня CO₂ в атмосфері, їх застосування також має низку викликів. Одним з головних обмежень є масштабність цих технологій. Більшість методів вимагають значних інвестицій, великих територій для реалізації або створення спеціалізованої інфраструктури. Окрім цього, деякі методи можуть мати непередбачувані екологічні наслідки або впливати на біологічного різноманіття. Крім того, багато з цих технологій потребують ретельної оцінки довгострокових наслідків, а також високої технологічної готовності та безпеки для забезпечення ефективності та стійкості.

Методи зниження концентрації парникових газів (CDR) пропонують шлях до досягнення "негативних викидів" і допомоги в боротьбі з кліматичною кризою, однак для їх реалізації потрібна ретельна оцінка ефективності, витрат та потенційних ризиків, а також інтеграція цих стратегій у загальну кліматичну політику.

1.3 Розпилення аерозолів у стратосфері як технологія кліматичної інтервенції

Розпилення аерозолів у стратосфері, також відоме як стратосферна аерозольна інтервенція, є однією з найбільш обговорюваних технологій геоінженерії для боротьби з глобальним потеплінням. Ця технологія імітує природний процес, який спостерігається після великих вулканічних вивержень, коли частинки сульфатів, що викидаються в атмосферу,

відбивають частину сонячного світла і тимчасово знижують температуру на планеті. [20,14]

Ідея базується на розпиленні мікроскопічних частинок, зазвичай діоксиду сірки (SO₂), у верхніх шарах атмосфери — у стратосфері, на висоті близько 20 км. Діоксид сірки, після викиду, вступає в хімічні реакції з водяною парою і киснем, утворюючи сульфатні аерозолі (частинки сірчаної кислоти). Ці аерозолі створюють шар у стратосфері, який відбиває частину сонячного світла назад у космос, зменшуючи кількість тепла, яке досягає поверхні Землі. Це схоже на природний процес, коли після великих вулканічних вивержень відбувається зниження глобальної температури (наприклад, після виверження вулкана Пінатубо у 1991 році).

Назва речовини	Переваги	Недоліки	Тривалість дії	Ефективність
Діоксид сірки (SO ₂)	Широко вивчений матеріал, створює аерозолі, які високу розсіювати світло.	Можливо руйнувати озоновий шар та спричинити кислотні дощі	Частинки залишаються у стратосфері близько 1-2 років, після чого випадають із атмосфери.	85%

<p>Сірчана кислота (H₂SO₄)</p>	<p>Висока здатність до формування аерозолів, які відбивають сонячне світло. Дозволяє уникнути проміжних реакцій, як у випадку SO₂.</p>	<p>Викликає значне руйнування озонового шару. Виробництво H₂SO₄ для таких масштабів розпилення технічно складне.</p>	<p>Близько 1-2 років.</p>	<p>80%</p>
<p>Карбонат кальцію (CaCO₃)</p>	<p>Менш шкідливий для озонового шару, може навіть компенсувати руйнування озону завдяки хімічній реактивності.</p>	<p>Менш ефективний у відбитті сонячного світла, ніж сульфатні аерозолі. Може спричинити локальні зміни у стратосферній хімії.</p>	<p>Частинки стабільні, але менш ефективні у тривалому масштабі.</p>	<p>70%</p>
<p>Діоксид</p>	<p>Дуже ефективний у розсіюванні сонячного світла через високу відбивну здатність.</p>	<p>Висока вартість виробництва та доставки.</p>	<p>Може залишатися у стратосфері до 2-3 років</p>	<p>~90%</p>

титану (TiO ₂)	Частинки менші, ніж у SO ₂ , тому менше шкодять атмосфері.	Потребує детальнішого вивчення впливу на кліматичні цикли.	через стабільність частинок.	
Алмази нанорозмірів (наноалмази)	Висока відбивна здатність, нейтральний вплив на озоновий шар і стратосферну хімію.	Надзвичайно дорогі у виробництві, складно створювати в необхідних масштабах. Технологія ще не готова до практичного використання.	Теоретично довготривали й ефект через надзвичайну стабільність частинок.	~95% (теоретично)

Таблиця 1.1 Вибір матеріалу для розпилення

Вибір матеріалу залежить від балансу між ефективністю, вартістю, тривалістю дії та екологічними ризиками. Наприклад, діоксид сірки та сірчана кислота є найкраще вивченими, але небезпечними для озонового шару. Карбонат кальцію і діоксид титану розглядаються як перспективні альтернативи з меншим впливом на озоновий шар, але вони менш ефективні чи дорогі. Наноалмази мають найвищу теоретичну ефективність, але через вартість поки не можуть бути використані в реальних умовах.[15,27]

Процес розпилення речовин у стратосфері є ключовим етапом технології стратосферної аерозольної інтервенції. Він включає кілька стадій, які забезпечують ефективне утворення шару аерозолів, що зменшує кількість сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню Землі. Речовини доставляються у стратосферу — шар атмосфери, розташований на висоті приблизно 10–50 км, де вони можуть залишатися тривалий час через низьку турбулентність і повільне осідання частинок. Основні методи доставки:

Стратосферні літаки — це спеціальні авіаційні апарати, які розробляються для виконання завдань у верхніх шарах атмосфери, на висоті близько 20-25 км. Їх використовують для розпилення речовин, здатних утворювати аерозолі в стратосфері, з метою зменшення глобальної температури через розсіювання сонячного випромінювання. Завдяки їхній унікальній здатності працювати в екстремальних умовах стратосфери, літаки є одним із ключових інструментів для реалізації технології кліматичної інтервенції. [23,21]

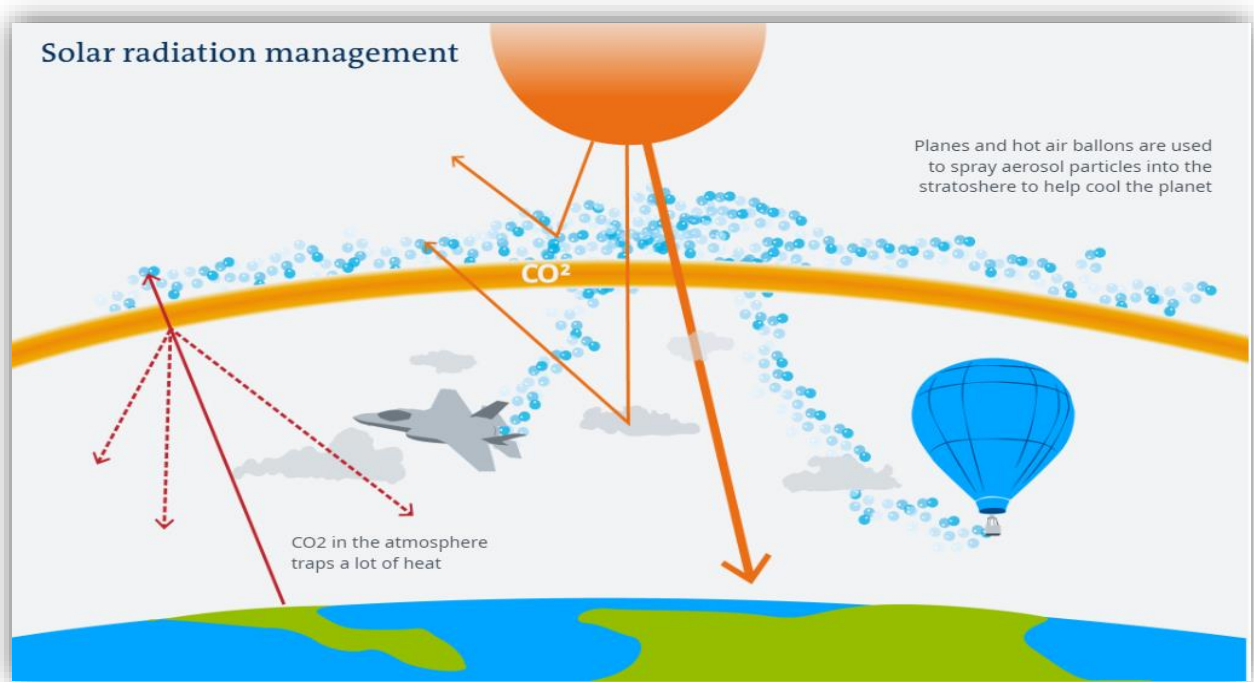
Для ефективного розпилення літаки оснащуються резервуарами для зберігання матеріалів (наприклад, діоксиду сірки або інших хімічних речовин) і системами форсунок високого тиску, які розпилюють ці речовини у вигляді мікроскопічних частинок. Частинки вивільняються на заданій висоті, поступово поширюються стратосферними вітрами і утворюють тонкий шар, який розсіює сонячне світло, зменшуючи нагрівання поверхні Землі.

Літаки, призначені для таких завдань, мають особливу конструкцію, яка дозволяє їм працювати у розрідженому повітрі стратосфери. Зазвичай це літаки з тонкими і дуже довгими крилами для підвищення підйомної сили, полегшеним корпусом і герметичними кабінами для екіпажу. Двигуни таких літаків спеціально адаптовані для роботи в умовах низького атмосферного

тиску, а системи управління дозволяють з високою точністю контролювати процес розпилення.

Перед початком операції визначається маршрут і висота польоту, які забезпечують найкращі умови для рівномірного розподілу частинок. Під час польоту літак рухається за запрограмованим маршрутом, поступово вивільняючи речовини. У реальному часі моніторинг процесу дозволяє відстежувати рівномірність розподілу аерозолів, а також коригувати параметри розпилення. [17,26]

Основними перевагами використання стратосферних літаків є точність доставки речовин, можливість працювати на глобальному або локальному рівні і вже існуючі розробки таких апаратів, які можна адаптувати до цих завдань. Наприклад, військові літаки, такі як Lockheed U-2 або Boeing WB-57, здатні працювати на великих висотах і можуть бути переобладнані для кліматичних інтервенцій. Проте в майбутньому передбачається створення спеціалізованих літаків із підвищеною вантажопідйомністю, електричними



двигунами і автоматичними системами управління.

Малюнок 1.5 Принцип дії літака в стратосфері

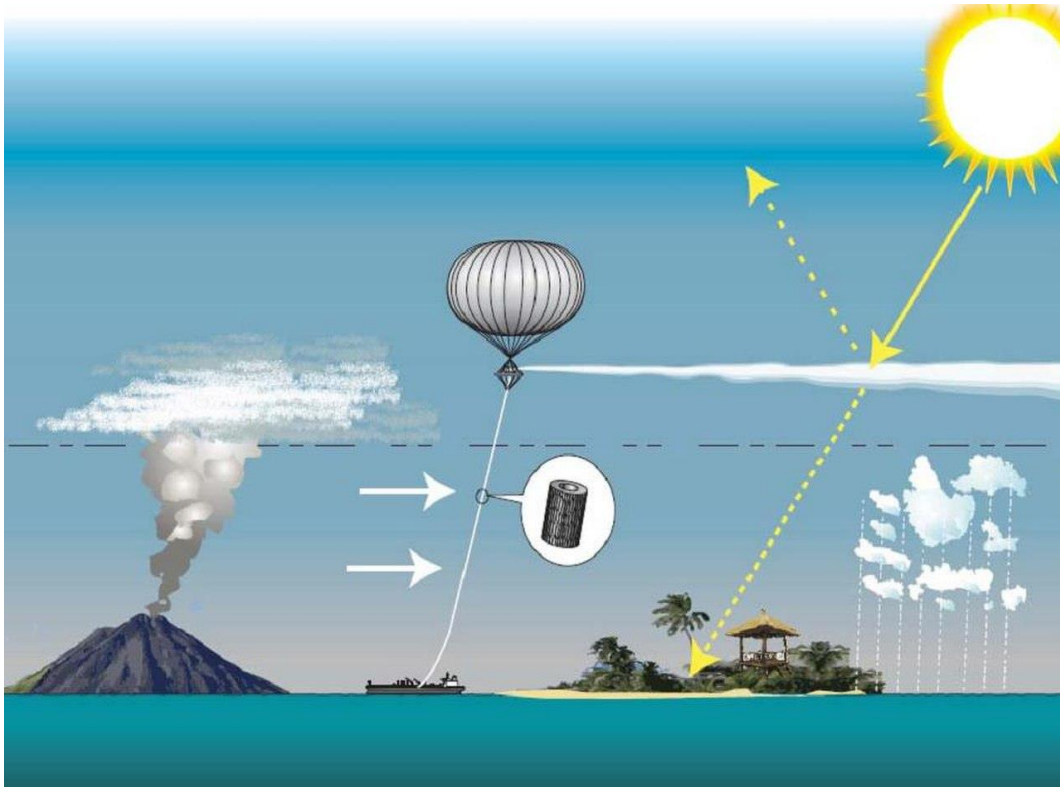
Попри перспективність технології, вона має певні обмеження. Літаки мають обмежену вантажопідйомність, що потребує великої кількості пального для досягнення значного впливу на клімат. Крім того, витрати на такі операції є високими, а викиди вуглецю від літаків можуть частково нейтралізувати отриманий ефект. Проте, завдяки їхній точності й можливості поступового впровадження, стратосферні літаки залишаються одним із найкращих варіантів для управління сонячною радіацією

Великі повітряні кулі - широко використовуються для розсіювання різних речовин на висоті. Їхня конструкція складається з оболонки, що утримує газ, який забезпечує підйом, а також системи дозованого вивільнення, що дозволяє рівномірно розподіляти речовину.

Перед запуском кулю ретельно готують. У спеціальний резервуар завантажують необхідну речовину, наприклад, рідину, порошок або гранули, в залежності від мети використання. Оболонку наповнюють газом, таким як гелій або водень, щоб забезпечити підйом. Після запуску куля поступово піднімається на необхідну висоту. На заданій висоті спеціальна система відкриває клапан, через який речовина випускається поступово. Це може бути у вигляді дрібнодисперсного туману, хмари порошку чи рівномірного розподілу гранул. Сучасні кулі обладнуються датчиками, GPS і телеметричними системами для контролю за процесом і коригування в реальному часі.[12,21]

Після завершення завдання куля спускається, а її конструкцію збирають для повторного використання або утилізують. Такий спосіб застосовують у сільському господарстві для внесення добрив чи засобів захисту рослин, у наукових дослідженнях для вивчення атмосфери, у розважальних заходах для створення ефектів, а також в екологічних проєктах для боротьби із забрудненням чи наслідками стихійних лих. Метод

забезпечує ефективне покриття великих площ і мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище



Малюнок 1.6 Технологічна реалізація введення аерозолів в стратосферному просторі

1.4 Теоретичне обґрунтування впливів аерозолів на відбивну здатність атмосфери

Аерозолі — це дрібні тверді частки або рідкі краплі, що перебувають у повітрі. У контексті геоінженерії, технологія розпилення аерозолів у стратосфері для боротьби з глобальним потеплінням передбачає введення в атмосферу певних хімічних речовин, таких як сірчані аерозолі (наприклад, сірчаній діоксид, SO_2). Метою цього процесу є зниження температури на планеті шляхом відображення частини сонячного випромінювання назад у космос, що веде до зменшення кількості тепла, яке досягає земної поверхні. Для розуміння механізму впливу аерозолів на відбивну здатність атмосфери

важливо розглянути теоретичні аспекти цього процесу та фізичні принципи, які лежать в основі його роботи.

Відбивна здатність і альbedo Землі

Альbedo — це характеристика поверхні або атмосфери, яка визначає, яку частину сонячного випромінювання вона відбиває назад у космос. Альbedo Землі залежить від багатьох факторів, зокрема від складу атмосфери, хмарного покриву, снігового покриву та рослинності. У зв'язку з геоінженерією, зміна альbedo за допомогою аерозолів може суттєво вплинути на баланс енергії на планеті, знижуючи кількість сонячної енергії, яка потрапляє на Землю.[31,26]

Коли аерозолі вводяться в стратосферу, вони діють як відбивачі світла. Завдяки їхній здатності відбивати сонячне випромінювання, аерозолі зменшують кількість енергії, що поглинається атмосферою та поверхнею Землі. Це створює ефект охолодження, який можна виміряти через зміну альbedo атмосфери.

- **Відбиття світла:** Аерозолі здатні відбивати як пряме, так і розсіяне сонячне випромінювання. Вони діють подібно до дзеркала, яке повертає частину сонячного світла назад у космос, зменшуючи кількість тепла, що поглинається Землею.
- **Розсіювання світла:** Крім прямого відбиття, аерозолі можуть також розсіювати світло, збільшуючи обсяг сонячного випромінювання, який відбивається від атмосфери. Це розсіювання підвищує альbedo і таким чином сприяє зменшенню температури.

Природні аерозолі, такі як вулканічні частки (наприклад, після виверження вулканів), вже демонструють вплив на альbedo Землі. Виверження вулканів, що супроводжується викидом сірчаних аерозолів у стратосферу, може призвести до тимчасового охолодження клімату на кілька

років через зменшення сонячного випромінювання, яке досягає поверхні Землі. Це явище є підставою для використання технології розпилення аерозолів як методи боротьби з глобальним потеплінням.

Розпилення аерозолів, зокрема сірчаних, може збільшити альbedo атмосфери, що дозволить відображати більше сонячного випромінювання і, відповідно, зменшити температуру на поверхні Землі. Така зміна буде залежати від кількості аерозолів, їхнього хімічного складу та тривалості їхнього перебування в стратосфері.[1,2]

Найбільш поширеними для геоінженерії є сірчані аерозолі, оскільки сірчаний діоксид (SO₂) має високий ступінь ефективності в відображенні сонячного випромінювання. Після того, як сірчаний діоксид потрапляє в стратосферу, він вступає в реакції з водяною паром та іншими хімічними речовинами, утворюючи сірчані кислоти (H₂SO₄), які знаходяться в атмосфері у вигляді дрібних часток.

Тривалість впливу	Регулювання концентрації	Регіональні зміни
<p>Частки аерозолів залишаються в стратосфері лише протягом кількох місяців або років, після чого вони осідають або виходять з атмосфери. Тому для досягнення постійного ефекту необхідно буде регулярно викидати нові</p>	<p>Потрібно розробити точні методи контролю кількості аерозолів в атмосфері, оскільки надмірна концентрація може мати негативні наслідки для інших аспектів кліматичної системи, таких як опади, врожайність сільськогосподарських</p>	<p>Вплив на альbedo може не бути рівномірним у всіх регіонах. Наприклад, в окремих районах може спостерігатися зниження температури, а в інших — навпаки, деякі тепліші регіони можуть стати ще теплішими через зміни в</p>

порції аерозолів.	культур або екосистеми.	атмосферних циркуляціях.
-------------------	-------------------------	--------------------------

Таблиця 1.2 Прогнозування ефектів зміни альbedo

Вплив аерозолів на відбивну здатність атмосфери є потужним інструментом для коригування глобальної температури, проте він також має серйозні екологічні та соціальні наслідки. Зміна альbedo через геоінженерію може допомогти знизити темпи глобального потепління, однак її ефекти на різні аспекти кліматичних і екосистемних процесів потребують детального дослідження та моніторингу.[5,21]

1.5 Фактори що впливають на ефективність розпилення аерозолів

Технологія розпилення аерозолів у стратосфері для зменшення інтенсивності глобального потепління є одним із методів геоінженерії, що має на меті охолодження клімату Землі шляхом віддзеркалення частини сонячного випромінювання назад у космос. Однак, ефективність цієї технології залежить від багатьох факторів, які визначають її здатність досягати бажаного охолодження та мінімізувати можливі негативні наслідки для довкілля. У цьому розділі будуть розглянуті основні фактори, що впливають на ефективність розпилення аерозолів у стратосфері.

Хімічний склад аерозолів	Властивості аерозолів	Потенційний вплив на ефективність розпилення	Примітки
Сірчисті аерозолі (сульфати)	Висока здатність відбивати сонячне випромінювання	Висока ефективність охолодження; може призвести	Основні кандидати для використання в геоінженерії

		до утворення кислотних дощів	
Нітрогенові аерозолі	Мають меншу здатність до відбиття сонячного випромінювання	Низька ефективність охолодження	Можливий вплив на озоновий шар
Вуглецеві аерозолі	Висока стабільність, але низька здатність відбивати світло	Може бути використано для довготривалого зберігання в атмосфері, але з меншою ефективністю	Потенціал для довгострокового впливу на клімат

Таблиця 1.3 Хімічні властивості аерозолів і їх вплив на ефективність розпилення

Одним з основних факторів, що визначають ефективність розпилення аерозолів, є їх хімічний склад. Найбільш обговорюваними аерозолями для геоінженерії є сірчисті аерозолі, зокрема сірчана кислота або сульфатні частки. Це пов'язано з тим, що сірчисті частки здатні ефективно відбивати сонячне випромінювання, що призводить до охолодження атмосфери.[2]

Однак важливою є їх стабільність у стратосфері, оскільки деякі хімічні сполуки можуть реагувати з іншими компонентами атмосфери, що змінює їх відображальні властивості. Наприклад, викид великих кількостей сульфатних часток може призвести до утворення кислотних дощів або мати негативний вплив на озоновий шар, що буде сприяти збільшенню ультрафіолетового випромінювання, що потрапляє на поверхню Землі. Таким чином, для

забезпечення високої ефективності розпилення аерозолів необхідно ретельно контролювати їх склад та стійкість у стратосфері.

Розмір часток аерозолів є важливим чинником, що безпосередньо впливає на їх здатність відбивати сонячне випромінювання. Частки, що мають діаметр від 0,1 до 1 мікрметра, є найбільш ефективними для віддзеркалення світла, оскільки вони мають оптимальні розміри для взаємодії з сонячним випромінюванням, яке має довжину хвилі від ультрафіолетового до видимого спектра.

Розмір часток (мікрметри)	Властивості часток	Вплив на ефективність розпилення аерозолів	Примітки
0,1 - 0,5 мкм	Малий розмір, високий ступінь розсіювання світла	Висока ефективність відбиття сонячного випромінювання	Оптимальний розмір для розпилення
0,5 - 1 мкм	Середній розмір, збереження стабільності в атмосфері	Середня ефективність, але більш стабільні в атмосфері	Можлива альтернатива при контролі тривалості перебування
1 - 3 мкм	Великий розмір, більш швидке осідання	Низька ефективність, частки можуть осідати до земної поверхні	Потребують більшого контролю при розпиленні

Таблиця 1.4 Розмір часток аерозолів і їх ефективність

Занадто великі частки можуть осідати в нижчих шарах атмосфери, а занадто малі — не ефективно відбивати сонячне світло. Ідеальний розмір часток визначається необхідністю максимального розсіювання сонячної енергії, без перевантаження атмосферних процесів. Тому, для досягнення бажаного ефекту охолодження, технологія повинна забезпечувати контроль над розміром часток аерозолів під час їх розпилення.

Ефективність геоінженерної технології розпилення аерозолів значною мірою залежить від того, як рівномірно аерозолі розподіляються в стратосфері. Нерівномірний розподіл часток може призвести до того, що деякі регіони Землі отримають більше сонячного світла, а інші — менше, що може спричинити незбалансовані кліматичні зміни.

Також важливою є висота, на якій проводиться розпилення. Наприклад, розпилення аерозолів в нижній стратосфері (від 10 до 20 км) може мати різний ефект порівняно з розпиленням на більшій висоті, оскільки аерозолі на різних рівнях атмосфери мають різні можливості для взаємодії з сонячним випромінюванням та іншими атмосферними процесами. Вибір правильної висоти і рівномірність розподілу є критичними для забезпечення ефективності технології.

Висота розпилення (км)	Опис ефекту	Вплив на ефективність технології	Примітки
10 - 20 км	Низька стратосфера, можливість впливу на озоновий шар	Можливе зниження ефективності через викиди, що впливають на озон	Вимагає ретельного контролю за хімічними процесами
20 - 30 км	Оптимальна	Висока	Це оптимальна

	висота для стабільного розподілу аерозолів	ефективність охолодження	висота для розпилення сульфатних аерозолів
30 - 50 км	Вища стратосфера, складно досягти рівномірного розподілу	Можливі непередбачувані результати через розсіяння аерозолів	Потребує додаткових досліджень

Таблиця 1.5 Висота розпилення аерозолів та її вплив на ефективність технології

Негативний вплив на довкілля може також позначитися на ефективності цієї технології. Наприклад, зниження інтенсивності сонячного випромінювання може вплинути на погодні умови, регулювання опадів і сезонні цикли, що в свою чергу може змінити екосистеми та біорізноманіття. У деяких випадках це може призвести до порушень у сільському господарстві або зменшення родючості ґрунтів, що знижує загальний ефект технології.

Нарешті, важливим фактором є політичне середовище та міжнародні угоди, які можуть обмежувати або сприяти використанню таких технологій. Наприклад, застосування технології розпилення аерозолів може вимагати глобальної співпраці між країнами, оскільки зміни клімату є глобальним явищем. Рішення щодо цієї технології повинні враховувати інтереси різних держав і впливати на взаємодію з іншими методами кліматичних змін.

Метеорологічний фактор	Опис впливу на ефективність розпилення аерозолів	Вплив на технологію	Примітки
Швидкість стратосферних вітрів	Швидкі вітри можуть сприяти швидкому розповсюдженню аерозолів	Знижена ефективність через розсіювання	Може бути використано для глобального охолодження, але знизить локальний ефект
Температура стратосфери	Холодніші умови сприяють довшому перебуванню часток в стратосфері	Висока стабільність аерозолів	Важливий параметр для визначення тривалості ефекту
Атмосферна вологість	Висока вологість може призводити до агрегації часток	Зменшення ефективності через утворення більших часток	Потрібно враховувати для контролю розміру часток

Таблиця 1.6 Метеорологічні умови та їх вплив на ефективність розпилення аерозолів

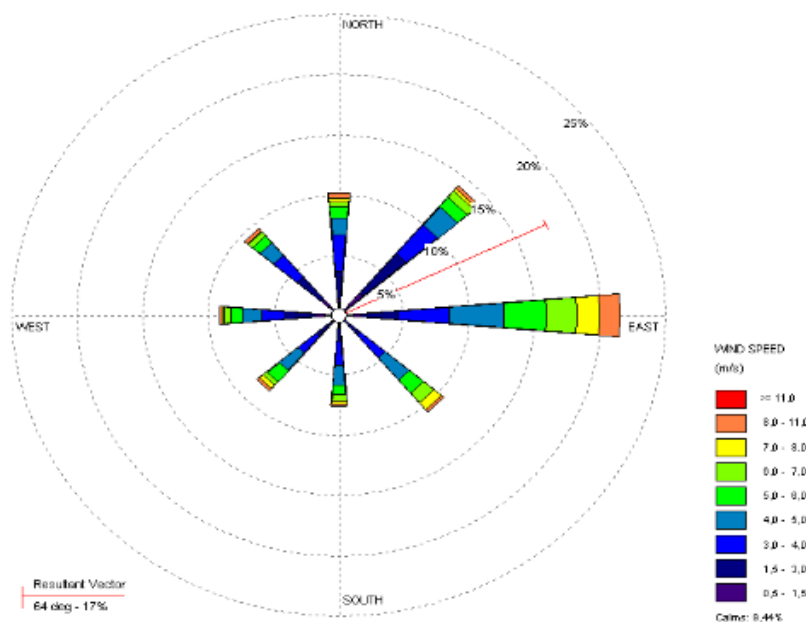
Отже, ефективність розпилення аерозолів у стратосфері для зменшення інтенсивності глобального потепління залежить від численних факторів, таких як хімічні властивості аерозолів, їхній розмір, розподіл у стратосфері, тривалість перебування в атмосфері, метеорологічні умови, а також можливі

екологічні та соціальні наслідки. Ретельне вивчення цих факторів є необхідним для визначення доцільності застосування цієї технології в боротьбі з глобальним потеплінням.

1.6 Результати моделювання зниження температури в наслідок розпилення аерозолів

У результаті моделювання отримуються прогнози зниження температури на різних рівнях атмосфери, а також на поверхні Землі. Зазначимо, що різні моделі можуть надавати різні результати, оскільки прогнозування кліматичних змін є складним і вимагає врахування численних параметрів. Одним із найбільш вивчених методів геоінженерії є використання сірчистих аерозолів, таких як сульфати, для відбиття сонячного випромінювання. Чисельні моделі, що враховують внесення таких аерозолів до стратосфери, показують, що на глобальному рівні це може призвести до значного зниження температури. Згідно з моделюваннями, введення сульфатних аерозолів може знизити середню глобальну температуру на 0,5-2°C, що є досить значним ефектом для регулювання температури на планеті. Це зниження температури може тривати від кількох років до десятиліть, в залежності від тривалості перебування аерозолів у стратосфері.

Проте, варто зазначити, що ефект охолодження буде нерівномірним і може відрізнятися в залежності від географічного положення. Так, моделі показують, що найбільше охолодження буде спостерігатися в тропічних і північних широтах, в той час як в південних широтах температура може знижуватися менше. Одним із важливих аспектів моделювання є також дослідження впливу розпилення аерозолів на регіональний клімат. Це включає в себе зміни у рівні опадів, зокрема:



Малюнок 1.6 Загальнорічна роза вітрів України у 2023 році

-Зменшення опадів — у результаті зниження температури та зміни в атмосферних потоках, деякі регіони можуть пережити зменшення кількості опадів. Наприклад, у південних районах Африки та в Австралії можуть виникнути засухи, пов'язані з порушенням звичних атмосферних процесів.

-Зміни у сезонності — розпилення аерозолів може призвести до зміщення сезонів, що має серйозні наслідки для сільського господарства.

Моделювання показує, що такі зміни можуть мати як позитивні, так і негативні наслідки для різних регіонів планети. Наприклад, в деяких районах знижена температура може призвести до зменшення повені або до зростання сільськогосподарських врожаїв, а в інших — до зниження врожайності через погіршення умов для росту рослин. Розпилення аерозолів у стратосфері може бути ефективним методом для досягнення охолодження клімату, з потенційним зниженням глобальної температури на 1-2°C. Однак цей метод має низку обмежень, зокрема в плані потенційних екологічних ризиків, таких як зміни в режимі опадів і вплив на озоновий шар. Тому розпилення

аерозолів має бути використане з обережністю, з постійним моніторингом результатів і можливими коригуваннями.

2.ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Потенціальний вплив на екосистеми на здоров'я людини

Захист від глобального потепління, який передбачає масштабне втручання в природні системи з метою боротьби зі зміною клімату, може мати значний потенційний вплив на екосистеми та здоров'я людини. Він охоплює два основні напрями: управління сонячним випромінюванням (SRM – Solar Radiation Management) та видалення вуглекислого газу (CDR – Carbon Dioxide Removal). Кожен з цих напрямів має свої ризики і переваги.

Геоінженерія, яка спрямована на масштабне втручання в природні процеси для боротьби зі зміною клімату, може мати значний негативний вплив на екосистеми. Технології, такі як управління сонячним випромінюванням (SRM) або видалення вуглекислого газу (CDR), здатні викликати серйозні порушення в екосистемах через зміну кліматичних умов, хімічний вплив та непередбачувані екологічні ланцюгові реакції. Наприклад, розпилення сульфатних аерозолів для відбиття сонячного світла може змінити режими опадів та знизити середньорічну температуру. Це може спричинити посухи в одних регіонах, що призведе до деградації земель і зниження врожайності сільськогосподарських культур, тоді як інші регіони можуть зіткнутися з надмірними опадами, які спричинять ерозію ґрунтів та повені.

Крім того, методи, пов'язані з океанським удобренням, наприклад, додавання заліза для стимулювання росту фітопланктону, можуть змінювати хімічний склад води, підвищуючи її кислотність. Це може викликати руйнування коралових рифів, які є осередками морського біорізноманіття, та негативно вплинути на харчові ланцюги у водних екосистемах. Іншим негативним наслідком є ймовірність надмірного розмноження токсичних водоростей, які загрожують риbam та іншим морським організмам.

Розпилення аерозолів у атмосферу також може спричиняти осідання хімічних речовин на поверхню землі та вод, що призведе до забруднення ґрунтів і вплине на здоров'я рослин і тварин. Наприклад, це може зменшити фотосинтетичну активність рослин або накопичувати токсини у водних ресурсах, які використовуються людьми та тваринами. Ланцюгові екологічні наслідки таких втручань можуть бути катастрофічними, оскільки зміни в одній частині екосистеми часто викликають ефект доміно. Зникнення або скорочення популяцій окремих видів може порушити баланс у харчових ланцюгах, викликати нестачу їжі для інших організмів та навіть зникнення ключових екологічних функцій, таких як запилення рослин чи очищення води.

Таким чином, ці методи, хоча й мають потенціал у боротьбі зі зміною клімату, але можуть створити додаткові ризики для природних систем, підвищуючи вразливість екосистем та спричиняючи довготривалі негативні наслідки.

Технологія	Негативний вплив на екосистеми	Приклад наслідків
Розпилення сульфатних аерозолів	Зміна кліматичних умов (зниження температури, зміна опадів)	Посухи в тропіках, збільшення повеней у помірних широтах
Океанське удобрення	Підвищення кислотності океанів, цвітіння токсичних водоростей	Руйнування коралових рифів, загибель риб через токсини
Лісовідновлення (масове садіння)	Витіснення природних екосистем, зменшення біологічного різноманіття	Заміна природних лісів монокультурами, деградація ґрунтів

Захоплення CO ₂ з повітря	Високий енергетичний вплив та зміни у землекористуванні	Використання великих площ для інфраструктури, витіснення дикої природи
Створення відбивних поверхонь	Локальні зміни температурного режиму	Перегрівання окремих регіонів, вплив на розподіл теплових потоків

Таблиця 2.1 – Негативний вплив на навколишнє середовище та можливі наслідки

Потенційний вплив на здоров'я людини

Застосування сульфатів для зменшення середньорічної температури може суттєво вплинути на здоров'я людини, оскільки втручання в кліматичні системи здатні викликати як прямі, так і непрямі наслідки. Одним із основних ризиків є погіршення якості повітря. Наприклад, використання сульфатних аерозолів для відбиття сонячного випромінювання може спричинити утворення дрібнодисперсних часток, які здатні проникати глибоко в дихальні шляхи. Це може збільшити кількість респіраторних захворювань, таких як астма та хронічна обструктивна хвороба легень (ХОХЛ), а також підвищити ризик серцево-судинних проблем.

Зниження рівня ультрафіолетового випромінювання через використання методів управління сонячним випромінюванням може призвести до дефіциту вітаміну D у населення. Це може негативно вплинути на стан кісткової системи, сприяти розвитку остеопорозу, а також послабити імунітет, що підвищить вразливість до інфекційних захворювань.

Крім того, геоінженерні проекти можуть створювати ризики для харчової безпеки. Наприклад, зміна режиму опадів або температури може знизити врожайність ключових сільськогосподарських культур, таких як пшениця, кукурудза чи рис. Це, в свою чергу, може призвести до недоїдання, особливо в регіонах, які вже страждають від нестачі продовольства.

Використання токсичних речовин або сполук, які залишаються після розпилення аерозолів, може створювати ризики хімічного забруднення води та ґрунту. Наприклад, деякі з хімікатів можуть накопичуватися у водних ресурсах, що вплине на питну воду і збільшить ризик отруєнь або захворювань, викликаних забрудненими продуктами харчування.

Зміни кліматичних умов, спричинені зниженням потепління, також можуть мати непрямі наслідки для здоров'я. Наприклад, зростання частоти посух, повеней або інших екстремальних погодних явищ може збільшити кількість випадків травм, смертей і психічних розладів. Тривала невизначеність щодо можливих наслідків методів також може викликати підвищений рівень стресу та тривожності серед населення.

Зрештою, вплив геоінженерних методів на здоров'я людини залежатиме від масштабу їх застосування, регіональних кліматичних умов і соціальних факторів. Хоча ці технології спрямовані на боротьбу зі зміною клімату, необхідно враховувати їх потенційні ризики для людського здоров'я перед впровадженням у практику.

Геоінженерія може суттєво вплинути на здоров'я людини, оскільки втручання в кліматичні системи здатні викликати як прямі, так і непрямі наслідки. Одним із основних ризиків є погіршення якості повітря. Наприклад, використання сульфатних аерозолів для відбиття сонячного випромінювання може спричинити утворення дрібнодисперсних часток, які здатні проникати глибоко в дихальні шляхи. Це може збільшити кількість

респіраторних захворювань, таких як астма та хронічна обструктивна хвороба легень (ХОХЛ), а також підвищити ризик серцево-судинних проблем.

Зниження рівня ультрафіолетового випромінювання через використання методів управління сонячним випромінюванням може призвести до дефіциту вітаміну D у населення. Це може негативно вплинути на стан кісткової системи, сприяти розвитку остеопорозу, а також послабити імунітет, що підвищить вразливість до інфекційних захворювань.

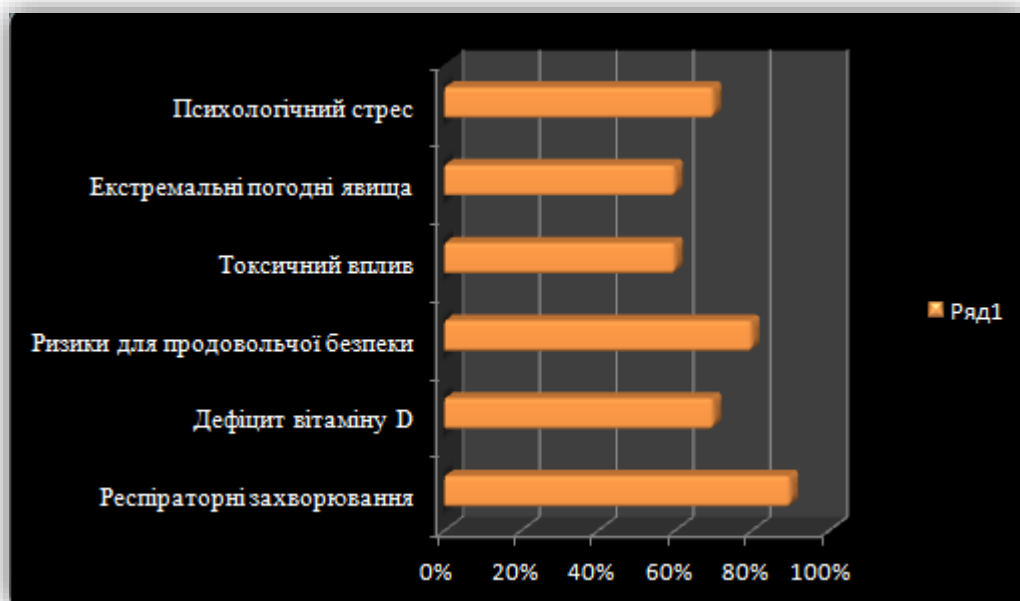
Крім того, ці проекти можуть створювати ризики для харчової безпеки. Наприклад, зміна режиму опадів або температури може знизити врожайність ключових сільськогосподарських культур, таких як пшениця, кукурудза чи рис. Це, в свою чергу, може призвести до недоїдання, особливо в регіонах, які вже страждають від нестачі продовольства.

Використання токсичних речовин або сполук, які залишаються після розпилення аерозолів, може створювати ризики хімічного забруднення води та ґрунту. Наприклад, деякі з хімікатів можуть накопичуватися у водних ресурсах, що вплине на питну воду і збільшить ризик отруєнь або захворювань, викликаних забрудненими продуктами харчування.

Зміни кліматичних умов, спричинені цими методами, також можуть мати непрямі наслідки для здоров'я. Наприклад, зростання частоти посух, повеней або інших екстремальних погодних явищ може збільшити кількість випадків травм, смертей і психічних розладів. Тривала невизначеність щодо можливих наслідків геоінженерії також може викликати підвищений рівень стресу та тривожності серед населення.

Зрештою, вплив на здоров'я людини залежатиме від масштабу її застосування, регіональних кліматичних умов і соціальних факторів. Хоча ці технології спрямовані на боротьбу зі зміною клімату, необхідно враховувати

їх потенційні ризики для людського здоров'я перед впровадженням у практику.



Графік 2.1 Потенційно негативний вплив на здоров'я людини та хвороби які можуть виникнути в відсотковому відношенні

2.2 Рекомендації альтернативного підходу у геоінженерії

Створення ефективного теплового екрану в атмосферному прошарку шляхом розпилення хімічних сполучень у стратосфері представляє інноваційний підхід до регулювання кліматичних умов на Землі. Цей метод відрізняється від інших технологій тим, що використовує хімічно інертну речовину, а саме карбонат кальцію, у вигляді аерозолів.

Розпилення карбонату кальцію у стратосфері призводить до створення тонкого екрануючого прошарку, який спроможний впливати на перехід інфрачервоного випромінювання сонця через атмосферу. Цей процес дозволяє регулювати тепловий потік, що досягає поверхні Землі, зменшуючи негативний вплив сонячної радіації на кліматичну систему.

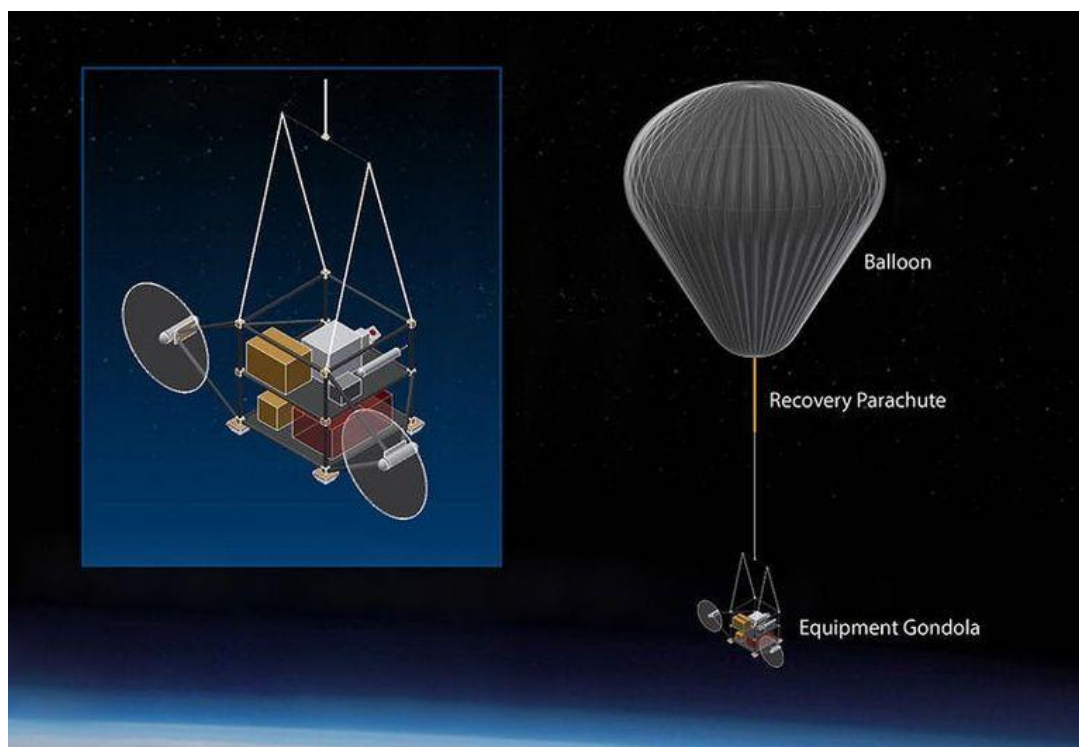
Однією з переваг цього методу є його безпека для оточуючого середовища, оскільки карбонат кальцію є натуральним і безпечним для біосфери матеріалом. Крім того, здійснюючи контрольоване розпилення речовини, можна точно регулювати товщину теплового екрану, а також змінювати його інтенсивність в залежності від потреб.

Важливим аспектом є також можливість масштабування цього методу, що дозволяє застосовувати його для глобального впливу на кліматичну систему. При цьому важливо враховувати потенційні екологічні та геополітичні наслідки, а також взаємодію з іншими кліматичними стратегіями.

Суттєвий недолік аналогів полягає у потенційних непередбачуваних наслідках та ризиках. Оскільки геоінженерія зазвичай втручається у дуже складну та неповністю зрозумілу систему - клімат Землі, можуть виникнути непередбачені ефекти, які можуть бути навіть більш серйозними, ніж проблеми, якими спробують зайнятися. Наприклад, вплив на атмосферні процеси може мати негативні наслідки для регіонального клімату, екосистем, сільського господарства та здоров'я людей. Додатково, існує ризик виникнення непередбачених побічних ефектів, таких як зміни в опадах, розподілі водних ресурсів та інших аспектах середовища. Крім того, існує й етичний аспект втручання людей у клімат, оскільки наслідки геоінженерії можуть бути відчутними для всього глобального співтовариства, але не всі можуть мати можливість вирішувати, які саме втручання будуть використані або які наслідки вони можуть мати.

Завданням є дослідження можливостей зменшення впливу кліматичних змін шляхом впливу на стратосферні аерозолі. Основна ідея полягає у вприскуванні аерозольних часток в верхні шари атмосфери з метою відбивання сонячного випромінювання назад у космос, що має наслідком зниження температури на поверхні Землі. Вивчення можливих ефектів від вприскування аерозолів на клімат, погоду та екосистеми. Це включає в себе

розуміння можливих побічних наслідків та розробку стратегій для мінімізації ризиків. А також аналіз впливу проекту на глобальний рівень, включаючи економічні, політичні та соціокультурні аспекти. Це також охоплює розробку міжнародного правового та політичного каркасу для регулювання подібних технологій у майбутньому.



Малюнок 2.2 Візуалізація доставки карбонату кальцію в стратосферний простір за допомогою повітряної кулі

Прототипом є підвищення альbedo Землі за рахунок викиду сульфатних аерозолів у стратосферу як підхід до компенсації деяких небажаних наслідків зміни клімату. Тут ми аналізуємо ансамбль симуляцій клімату двадцять першого століття, призначених для вивчення стратегічного підходу. Зокрема, стратосферні ін'єкції сірки виконуються під кутом 15° і 30° у обох півкулях з метою мінімізації змін поверхневої температури, як у середньому глобальному, так і в її градієнтах між півкулями і від екватора до полюса. Цей підхід досягає цих цілей і знижує раніше відзначені негативні наслідки управління сонячною радіацією, такі як занадто сильне похолодання в

тропіках та ослаблення опадів над сушею. Тим не менше, гідрологічні реакції над північною частиною

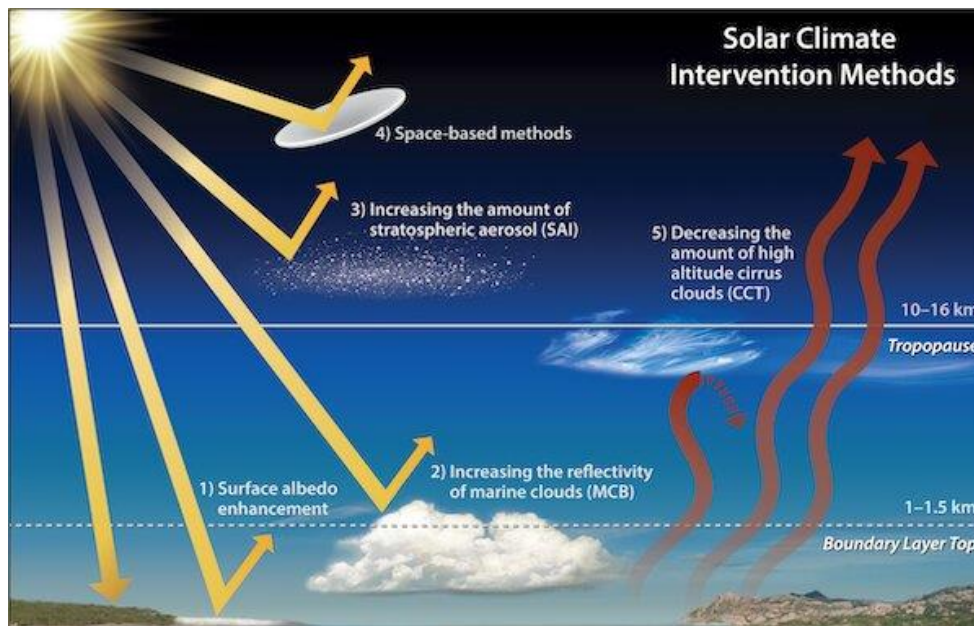
Атлантичного океану призводять до прискорення атлантичної меридіональної опрокидової циркуляції та до продовження потепління глибоких та полярних океанів, особливо в районі південної Гренландії. Ці зміни можуть викликати продовжене, хоч і повільніше, танення кріосфери та глобальне підвищення рівня моря. Наші рекомендації демонструють складність пов'язаної реакції клімату на геоінженерію та підкреслює необхідність значного прогресу в нашій здатності моделювати пов'язану кліматичну систему та постійного вдосконалення стратегій і як передумови для їх успішної реалізації

Запропонований метод полягає в тому що розпилення карбонату кальцію в стратосфері включає в себе деякі ключові етапи та обладнання, яке може бути використане для впровадження цієї технології.

Літаки є один з можливих засобів виконання розпилення - використання спеціалізованих літаків, оснащених системами для розпилення частинок карбонату кальцію у вищих шарах атмосфери або інша альтернатива - використання великих повітряних куль, які можуть піднімати обладнання та розпилювати матеріал у стратосфері. Під час процесу розпилення, літак або повітряна куля піднімається на висоту, необхідну для досягнення стратосфери, зазвичай близько 20 км вище від поверхні Землі. Після досягнення необхідної висоти, спеціальне обладнання на борту літака або кулі випускає невелику кількість карбонату кальцію у вигляді аерозолів, (під час експерименту планується випустити дуже невелику кількість матеріалу, від 100 грамів до 2 кілограмів. точна кількість речовини, яку використовуватимуть, залежать від конкретних параметрів експерименту та його мети.

Такий діапазон кількості дозволяє проводити експерименти з мінімальним впливом на довкілля, але при цьому забезпечує достатню кількість матеріалу для вивчення його впливу на атмосферні процеси)частинки карбонату кальцію розподіляються в атмосфері під дією повітряних потоків і взаємодіють з іншими складовими атмосфери. Після випуску, частинки карбонату кальцію будуть піддаватися розподілу в атмосфері під дією вітрів та інших атмосферних процесів, вони можуть пересуватися на значні відстані від місця розпилення, впливаючи на кліматичні умови та характеристики атмосфери.

Карбонат кальцію (CaCO_3) має кілька хімічних властивостей, які роблять його ефективним екранувальним матеріалом для інфрачервоного випромінювання сонця в стратосфері. Речовина може поглинати інфрачервоне випромінювання сонця, що призводить до його конвертації в інші сполуки та розпаду, який не видає шкідливих реакційних продуктів Карбонат кальцію є хімічно інертною речовиною, що означає, що він не реагує з іншими хімічними сполуками в атмосфері, що може знизити ризик виникнення небажаних хімічних реакцій або побічних ефектів. Також треба відмітити, що карбонат кальцію має тенденцію залишатися стійким у високих шарах атмосфери і не розкладатися під впливом сонячного випромінювання або інших атмосферних процесів.



Малюнок 2.3 Схематичне зображення віддзеркалення випромінювання
в космос

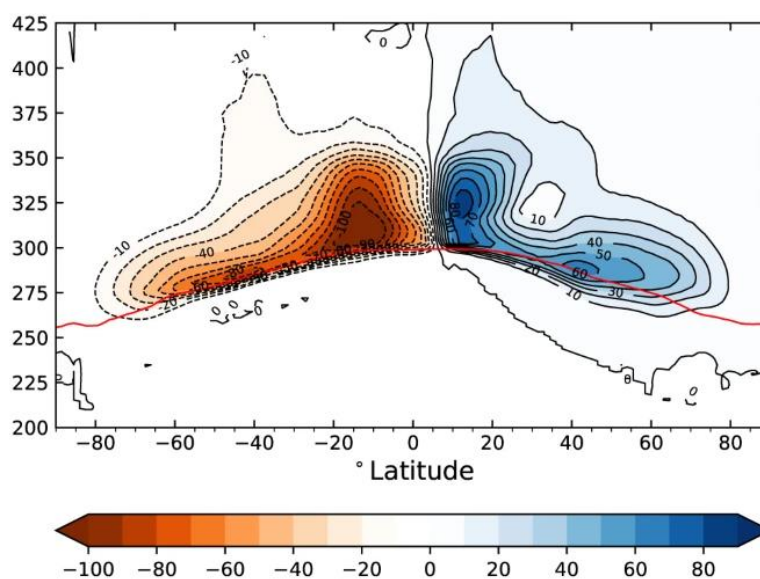
Порівнюючи метод розпилення карбонату кальцію в стратосфері з іншими методами сонячної геоінженерії, можна виокремити кілька переваг. Карбонат кальцію - досить поширена та доступна речовина, що може бути здобута з природних джерел. Це робить його вигідним варіантом для використання у масштабних проектах. Інші методи, такі як впорскування сірки в атмосферу, можуть бути складні для контролю та регулювання дозування. У випадку розпилення карбонату кальцію можливо легше контролювати кількість матеріалу, що випускається, що може допомогти у запобіганні непередбачених наслідків.

2.3 Можливі довгострокові наслідки для кліматичних систем

Технологія геоінженерії, зокрема розпилення аерозолів у стратосфері, передбачає використання хімічних речовин для відображення частини сонячного випромінювання назад у космос, з метою охолодження Землі та зменшення темпів глобального потепління. Хоча такі технології мають потенціал для негайного зниження температури, вони також можуть призвести до серйозних довгострокових наслідків для кліматичних систем

планети Перше що зміниться це Атмосферна циркуляція, а точніше зміни в температурі та розподілі вологи можуть привести до зміщення кліматичних зон. Наприклад, тропічні регіони можуть стати ще жаркішими, в той час як інші райони можуть зазнати охолодження, що змінить загальний характер погодних умов.[15,31]

Мусонні дощі можуть змінити свої цикли. У деяких регіонах це може призвести до посух, в інших — до екстремальних опадів. Це створить серйозні виклики для сільського господарства, водозабезпечення та екосистем. Атмосферні зміни також можуть вплинути на океанські течії, які грають ключову роль у розподілі тепла по планеті. Зміна температури води в океанах може порушити ці течії, що матиме довгострокові наслідки для глобальної кліматичної системи, включаючи підвищення рівня океанів, зміни у біорізноманітті та інші проблеми.



Малюнок 2.4 Зміна атмосферної циркуляції за період 1976-2022 роки

Значний вплив може відобразитись на сільському господарстві. Зниження температури може скоротити період вегетації в багатьох регіонах, особливо у південних широтах. Це може призвести до зниження врожайності в районах, де вже спостерігається дефіцит води та оптимальних умов для

вирощування основних сільськогосподарських культур. несення аерозолів може призвести до зміни кількості опадів у різних регіонах. Це може зробити деякі райони більш придатними для сільськогосподарського виробництва, тоді як інші зазнають посух або екстремальних погодних явищ, що зробить сільське господарство важчим або неприбутковим. Це може вплинути на природні екосистеми, змінюючи умови для тварин і рослин. Наприклад, зміна температури та опадів може скоротити біорізноманіття в деяких районах, вивести деякі види з їхніх природних середовищ і порушити ланцюги харчування.

Одним із найбільших побоювань є те, що певні аерозолі, які можуть бути використані для геоінженерії, впливають на озоновий шар використання сірчанних аерозолів (наприклад, сірчаного діоксиду) може мати негативний вплив на озоновий шар, оскільки ці аерозолі можуть сприяти його руйнуванню. Озоновий шар є критично важливим для захисту Землі від шкідливого ультрафіолетового (УФ) випромінювання, яке може призвести до онкологічних захворювань у людей і тварин, а також до порушення екосистем.[13,14]

Зниження озонового шару підвищить рівень ультрафіолетового випромінювання, що може негативно вплинути на здоров'я людей, тварин і рослин, спричинити пошкодження сільськогосподарських культур, зниження врожайності і погіршення умов для життя на планеті.

Зміни в атмосферних умовах можуть призвести до зміщення або зменшення опадів у певних регіонах. Це може погіршити доступ до прісної води в районах, де вона вже є обмеженим ресурсом, або спричинити збільшення повеней в інших. Зміна температури води в океанах і річках може вплинути на здатність води утримувати кисень, що може погіршити умови для водних екосистем. Зниження рівня кисню у воді може спричинити вимирання риб та інших водних. Зміни температури та хімічного складу води

можуть вплинути на морські екосистеми, зокрема на коралові рифи, які вже страждають від підвищення температури океанів. Зміна умов для морських видів може призвести до втрати біорізноманіття і порушення харчових ланцюгів.

3. СОЦІАЛЬНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ГЕОІНЖИНЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

3.1 Міграція населення та соціальні конфлікти

Міграція населення та соціальні конфлікти — це одні з найбільш серйозних соціальних наслідків застосування технології геоінженерії, зокрема технології розпилення аерозолів у стратосфері для боротьби з глобальним потеплінням. Порушення екосистем, зміна кліматичних умов, зниження врожайності та зміна доступу до водних ресурсів можуть викликати масштабну міграцію населення, а також соціальні конфлікти між державами та всередині країн.

Одним із наслідків застосування геоінженерії, яке може спричинити потік мігрантів, є зміна кліматичних умов, що зробить деякі території непридатними для життя.

Прогнозовані потоки мігрантів: Найбільше постраждають від змін клімату країни, що розвиваються, зокрема, такі як країни Південної Азії, Африки, Латинської Америки, де населення вже стикається з важкими умовами життя (бідність, відсутність доступу до води, засухи). Проте навіть розвинені країни можуть відчувати ефект через масову міграцію, що створить напругу на ринку праці, підвищить конкуренцію за ресурси та створить ризики соціальних заворушень.

Масова міграція та зміни в умовах життя можуть призвести до серйозних соціальних конфліктів на різних рівнях:

- Конфлікти між країнами: Кліматичні зміни можуть спровокувати економічні та політичні конфлікти між державами, особливо щодо розподілу природних ресурсів, таких як вода. Наприклад, країни, що розташовані в басейнах річок, можуть вступити в суперечку через обмежений доступ до води, що посилиться через зміни клімату.

- Конфлікти всередині країн: У країнах, де існують значні соціальні та економічні нерівності, зміна клімату може привести до внутрішніх конфліктів через боротьбу за доступ до ресурсів. У сільських районах зменшення врожайності та доступу до води може привести до соціальних заворушень, вуличних протестів і навіть громадянських воєн.
- Економічні конфлікти через зміну ресурсів: Відсутність достатніх природних ресурсів може посилити конкуренцію за робочі місця, житло, продовольство та інші життєво важливі ресурси, що може призвести до росту соціальних напружень, зокрема між місцевими жителями та новоприбулими мігрантами.[1,26]

Оскільки технологія розпилення аерозолів у стратосфері може мати значні соціальні та економічні наслідки, реакція країн на її застосування може бути різною, залежно від їхнього економічного розвитку, політичних інтересів та кліматичних умов.

Країна/Регіон	Згода на застосування геоінженерії	Незгода на застосування геоінженерії
Розвинені країни	Великі інвестиції в наукові дослідження, підтримка, якщо результати обіцяють зниження негативного впливу зміни клімату.	Високий рівень занепокоєння з приводу можливих непередбачуваних наслідків і ризику глобальної екологічної дестабілізації.
Країни що розвиваються	Бажання підтримати технології через потенціал для зниження глобального потепління	Острозможні країни бояться впливу на сільське господарство, зміни погодних умов,

		та зменшення природних катастроф.	ризик соціальних конфліктів.
Країни, що розвиваються (африканські та азіатські)	що та	Потенційна підтримка через прогнозовану користь для агросектора.	Опір через небезпеку посилення нерівності, нестабільність у сільському господарстві.
Малі острівні держави		Згода через загрозу від підвищення рівня океанів.	Сумніви щодо наслідків на довкілля і можливість ескалації міжнародних конфліктів через контроль за кліматом.

Таблиця 3.1 Думка країн щодо застосування геоінженерії

Міграція та соціальні конфлікти — це важливі аспекти, які потрібно враховувати при розгляді потенціалу технологій геоінженерії. Зміни клімату, викликані такими технологіями, можуть значно вплинути на соціальну та економічну ситуацію, підвищуючи ризики для бідних країн і спричиняючи напругу між державами та всередині них. Це робить важливим міжнародне співробітництво та створення чітких механізмів регулювання для мінімізації негативних наслідків.

3.2 Економічні витрати на адаптацію

Якщо технологія розпилення аерозолів стане частиною глобальної стратегії боротьби з глобальним потеплінням, вона вимагатиме значних фінансових інвестицій. Проте існують значні економічні витрати не тільки на її реалізацію, а й на адаптацію до змін:

Витрати на підтримку технології: Для масштабного впровадження технології буде потрібна постійна інвестиція в інфраструктуру для доставки аерозолів до стратосфери, включаючи літаки, ракети, установки для виробництва аерозолів тощо. Це вимагатиме фінансування від урядів, міжнародних організацій або приватних інвесторів.

Витрати на адаптацію сільського господарства та інфраструктури: Зміни в кліматі потребуватимуть адаптаційних заходів у багатьох країнах, зокрема на розвиток нових сільськогосподарських технологій, нових сортів культур, адаптованих до змінених кліматичних умов. Крім того, буде необхідно інвестувати в нові водозабезпечувальні системи, інфраструктуру для боротьби з екстремальними погодними явищами (посухи, повені) та нові системи управління ресурсами.[26,29]

Фінансова підтримка для найбідніших країн: Найбідніші країни, які є найбільш уразливими до наслідків кліматичних змін, також потребуватимуть фінансової допомоги для адаптації до нових умов. Ці витрати можуть обтяжити міжнародні організації, а також країни, що найбільше сприяють впровадженню технології .

Категорія витрат	Опис	Приблизні витрати
Інвестиції в інфраструктуру для доставки аерозолів	Витрати на створення і підтримку систем для доставки аерозолів у стратосферу (літаки, ракети тощо).	\$10 млрд - \$50 млрд на рік
Розробка нових сільськогосподарських технологій	Витрати на адаптацію сільського господарства до змін клімату (нові види культур, зрошення).	\$5 млрд - \$20 млрд на рік

Модернізація водозабезпечувальних систем	Створення нових або модернізація існуючих систем водозабезпечення для адаптації до нових умов.	\$1 млрд - \$10 млрд на рік
Впровадження нових систем управління ресурсами	Витрати на створення нових механізмів для більш ефективного використання водних та земельних ресурсів.	\$2 млрд - \$7 млрд на рік
Міжнародна фінансова допомога для найбідніших країн	Фінансова підтримка для країн, що постраждали від кліматичних змін, для забезпечення їх адаптації.	\$3 млрд - \$15 млрд на рік
Інвестиції в системи прогнозування і моніторингу клімату	Витрати на дослідження, моделювання та прогнозування змін клімату для своєчасної адаптації.	\$500 млн - \$5 млрд на рік
Розвиток нових інфраструктурних проектів для боротьби з екстремальними погодними явищами	Витрати на створення інфраструктури для боротьби з повенями, посухами та іншими екстремальними погодними явищами.	\$2 млрд - \$10 млрд на рік

Таблиця 3.2 опису економічних витрат на адаптацію до використання технології розпилення аерозолів у стратосфері

Пояснення до витрат:

1. *Інвестиції в інфраструктуру для доставки аерозолів:* Цей компонент включає витрати на створення і підтримку літальних апаратів або ракет, що будуть використовуватися для доставки аерозолів до стратосфери, а також на запуск і моніторинг цих систем.
2. *Розробка нових сільськогосподарських технологій:* Враховується необхідність впровадження нових технологій для сільського господарства, таких як генетично модифіковані культури, стійкі до змін клімату, або нові методи зрошення.
3. *Модернізація водозабезпечувальних систем:* Зміни в режимі опадів та температурі можуть вимагати значних інвестицій у нові технології водозабезпечення, наприклад, системи збору дощової води або нові системи для очищення води.[25,23]
4. *Впровадження нових систем управління ресурсами:* Для боротьби з дефіцитом природних ресурсів, таких як вода та земля, потрібно створити нові політики, програми моніторингу та ефективного використання цих ресурсів.
5. *Міжнародна фінансова допомога для найбідніших країн:* Найбідніші країни, що постраждали від кліматичних змін, можуть потребувати міжнародної фінансової допомоги для адаптації до нових умов.
6. *Інвестиції в системи прогнозування і моніторингу клімату:* Враховуються витрати на створення ефективних систем прогнозування кліматичних змін та моніторингу екологічних наслідків, що дозволить швидко реагувати на зміни в атмосфері.
7. *Розвиток нових інфраструктурних проєктів для боротьби з екстремальними погодними явищами:* Потрібно інвестувати в інфраструктуру, здатну витримувати екстремальні умови —

будівництво укриттів, дамб, систем попередження повеней та інших заходів для зменшення збитків від природних катастроф.

Впровадження технологій може сприяти посиленню соціальної та економічної нерівності. Країни, які зможуть фінансувати такі технології, отримають короткострокові вигоди у вигляді стабільнішого клімату, однак найбільш вразливі країни, які не зможуть дозволити собі такі інвестиції, ризикують постраждати від негативних ефектів, таких як зміщення кліматичних зон, деградація земель, зниження врожайності тощо.

Загалом, технологія розпилення аерозолів у стратосфері може мати значні соціальні та економічні наслідки, включаючи зміни в сільському господарстві, водних ресурсах, можливість міграції, виникнення нових соціальних конфліктів і додаткові витрати на адаптацію. Ці наслідки потребують ретельної оцінки і збалансованих рішень, оскільки впровадження такої технології може привести до непередбачуваних або навіть негативних ефектів для найбільш уразливих груп населення і країн. Враховуючи ці аспекти, важливо забезпечити глобальне співробітництво, прозорість та справедливість у впровадженні технологій, щоб мінімізувати ризики і забезпечити стійкий розвиток в умовах змінюваного клімату.

3.3 Відношення суспільства до геоінженерії та етичні питання

Відношення суспільства до геоінженерії

Відношення суспільства до геоінженерії залишається змішаним і складним. Це питання викликає як підтримку, так і обурення серед різних соціальних груп, організацій, а також науковців і політиків. Багато хто вважає геоінженерію можливим шляхом до боротьби з глобальним потеплінням, однак для іншої частини суспільства її використання є небезпечним і неетичним. Зокрема, розпилення аерозолів у стратосфері як метод боротьби з кліматичними змінами має багато прихильників серед

науковців, що вбачають у цьому потенціал для зменшення температури на планеті. Проте існує і значна частина скептиків, які ставляться до таких технологій з обережністю, вважаючи їх занадто ризикованими і недостатньо перевіреними.[21,26]

Одним із основних аспектів, що викликає занепокоєння у суспільстві, є непередбачуваність довгострокових наслідків для екосистем та людства в цілому. Геоінженерні технології, зокрема розпилення аерозолів, можуть мати не тільки позитивні ефекти, а й негативні — від зміни кліматичних умов до порушень у сільському господарстві або біорізноманітті. У багатьох країнах, особливо в тих, що розвиваються, існує побоювання, що застосування таких технологій може призвести до ще більшої нерівності, де багатші країни, які контролюють ці технології, будуть визначати долю решти світу, не враховуючи місцеві умови та потреби.

Інший аспект — це роль геоінженерії як «панцею» або відстроченою відповіддю на проблему глобального потепління. Багато громадян та екологічних активістів вважають, що використання геоінженерії може відвернути увагу від необхідності зниження викидів парникових газів, що є першочерговим завданням для боротьби зі змінами клімату.

Етичні питання застосування геоінженерії

Застосування геоінженерії піднімає низку етичних питань, які потребують ретельного аналізу та обговорення. Ось кілька основних проблем:

- **Невизначеність наслідків і відповідальність:** Одним із головних етичних питань є непередбачуваність результатів застосування геоінженерії. Враховуючи, що викиди аерозолів у стратосферу можуть мати глобальні масштаби, важко передбачити, які будуть наслідки для різних регіонів, екосистем і людства в цілому. Хто буде нести відповідальність за можливі негативні наслідки — науковці, які

розробляють технології, уряди, що їх впроваджують, або ж міжнародна спільнота? Це питання складне і потребує чіткої правової бази.

- **Моральна легітимність втручання в природу:** Одним з основних аргументів проти геоінженерії є питання моралі: чи маємо ми право втручатися в глобальні природні процеси на такому масштабі? Багато людей вважають, що ми повинні поважати природу і уникати технологій, які можуть змінити її баланс, навіть якщо це спрямовано на запобігання катастрофічним змінам клімату.[26,25]
- **Нерівність у впливі технологій:** Як уже згадувалося, геоінженерія може мати різні ефекти в залежності від регіону. Країни з розвиненими економіками, ймовірно, отримають більше вигоди від таких технологій, тоді як бідніші регіони можуть зазнати серйозних збитків, оскільки кліматичні зміни можуть ускладнити їхні умови для існування. Це піднімає питання справедливості і рівності в застосуванні геоінженерії на глобальному рівні.
- **Ризик використання технології в політичних цілях:** Ще одним серйозним етичним аспектом є можливість використання геоінженерії для політичних цілей. Якщо лише кілька держав матимуть можливість впливати на глобальний клімат, то виникає ризик, що це може стати інструментом геополітичного впливу або навіть маніпуляцій, що суперечить інтересам інших країн чи народів.
- **Демократичні процеси і участь громадян:** Іншим важливим питанням є те, наскільки громадськість має бути залучена до прийняття рішень щодо використання таких технологій. Дослідження та розробка геоінженерії зазвичай зосереджені в руках урядів або великих корпорацій, що ставить під сумнів, чи є ці рішення дійсно легітимними, якщо вони не мають повної підтримки з боку населення, яке може бути сильно зачеплене такими технологіями.

Загалом, застосування геоінженерії вимагає глибокого етичного аналізу і міжнародних консультацій. Необхідно враховувати не лише наукові та технічні аспекти, а й соціальні, економічні та культурні наслідки для різних країн і регіонів. Важливо, щоб будь-які рішення про впровадження таких технологій були прийняті в рамках прозорого процесу, який включає всі зацікавлені сторони та забезпечує довгострокову стабільність і справедливість для всіх людей на планеті.

Країна	Підтримка застосування геоінженерії	Протидія застосуванню геоінженерії	Не визначились	Основні причини підтримки/протидії
США	40%	45%	15%	Підтримка через боротьбу з кліматичними змінами, протидія через екологічні та етичні побоювання
Європейський Союз	38%	50%	12%	Протидія через невизначеність наслідків для екосистем та здоров'я
Китай	55%	30%	15%	Підтримка через швидке вирішення проблеми забруднення повітря та

				глобального потепління
Індія	40%	45%	15%	Протидія через побоювання щодо соціальних та економічних наслідків для бідних країн
Бразилія	35%	50%	15%	Протидія через етичні та екологічні питання, підтримка в умовах сильних кліматичних змін
Південна Африка	50%	40%	10%	Підтримка через необхідність адаптації до змін клімату, але побоювання за безпеку і довгострокові наслідки
Австралія	42%	48%	10%	Протидія через відсутність впевненості в ефективності технології

Таблиця 3.3 Результати опитування щодо ставлення громадськості до геоінженерії

Висновок

У дипломній роботі було проведено дослідження ефективності та потенційного негативного впливу на довкілля геоінженерної технології розпилення аерозолів у стратосфері як одного з можливих способів боротьби з глобальним потеплінням. Аналіз показав, що дана технологія має значний потенціал у зменшенні інтенсивності глобального потепління шляхом зниження кількості сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, завдяки розпиленню аерозолів, які відбивають частину сонячного світла назад у космос.

Однак, незважаючи на її потенціал, розпилення аерозолів супроводжується рядом серйозних екологічних та соціальних ризиків. Потенційний вплив на клімат, екосистеми та здоров'я людей може бути негативним, зокрема через зміни в режимах опадів, зниження озонового шару, а також можливе посилення інших екологічних проблем, таких як забруднення атмосфери або зміни в біорізноманітті.

Отже, для ефективного впровадження цієї технології необхідно проведення додаткових досліджень, які дозволять краще зрозуміти її довгострокові наслідки та розробити стратегії для мінімізації негативного впливу. Важливим є також розгляд альтернативних рішень, таких як зменшення викидів парникових газів, розвиток поновлюваних джерел енергії та збереження природних екосистем, які можуть бути більш стійкими та безпечними для навколишнього середовища.

Список Літератури

1. **Crutzen, P. J.** (2006). "Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve the global warming debate?" *Climate Change*, 77(3–4), 211–220.
2. **MacMartin, D. G., et al.** (2014). "Solar geoengineering as a climate policy option: A review of the science." *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 1-20.
3. **Robock, A., et al.** (2008). "Regional climate responses to geoengineering with aerosols." *Geophysical Research Letters*, 35(20), L20707.
4. **Keith, D. W., et al.** (2010). "The influence of large-scale aerosol injection on global climate." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D10), D10207.
5. **Budyko, M. I.** (1977). "Climatic Changes." *American Geophysical Union*.
6. **Hamilton, C., et al.** (2015). "The implications of solar radiation management for governance." *Nature Climate Change*, 5, 231–238.
7. **Anderson, J. L., & Keith, D. W.** (2013). "National research needs for solar geoengineering." *Environmental Research Letters*, 8(3), 035014.
8. **Dykema, J. A., et al.** (2014). "Aerosol geoengineering: A review of the state of the science." *Environmental Research Letters*, 9(3), 034009.
9. **Tilmes, S., et al.** (2009). "The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes." *Science*, 320(5882), 1201–1204.
10. **Lunt, D. J., et al.** (2010). "Geoengineering responses to climate change in the HadGEM1 and HadCM3 climate models." *Geophysical Research Letters*, 37(17), L17703.
11. **Kravitz, B., et al.** (2013). "Aerosol sequestration in the stratosphere: A review of the risks and opportunities." *Environmental Research Letters*, 8(2), 024020.

12. **MacMartin, D. G., et al.** (2019). "Solar geoengineering and the intergenerational and international dynamics of climate policy." *Nature Climate Change*, 9, 289–295.
13. **Liao, H., et al.** (2014). "Impact of geoengineering on the hydrological cycle in the context of climate change." *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(16), 8507–8527.
14. **Fleming, J. R.** (2010). "Fixing the sky: The checkered history of weather and climate control." *Columbia University Press*.
15. **Gernot, H. L.** (2013). "Geoengineering and governance: The key issue in the debate." *Environmental Politics*, 22(6), 943-960.
16. **Zhu, J., et al.** (2016). "Geoengineering impacts on ecosystems: A review of potential negative effects of stratospheric aerosol injection." *Global Environmental Change*, 39, 170–182.
17. **Gacke, B., & McLaren, D.** (2018). "The ethics of geoengineering: Global justice and climate change." *Cambridge University Press*.
18. **Bickel, J. E., & Lane, W. H.** (2009). "Economic assessment of stratospheric aerosol geoengineering." *Climatic Change*, 92(3–4), 292–304.
19. **Boucher, O., et al.** (2013). "Climate response to aerosol geoengineering." *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1678–1682.
20. **Choullarton, T. W., et al.** (2012). "Geoengineering the climate: Is it a viable option?" *Climate Research*, 51(1), 1-15.
21. Gaffney, O., & Warren, R. (2019). "Exploring the feasibility and risks of stratospheric aerosol injection for climate geoengineering." *Environmental Science & Technology*, 53(13), 7432-7440.
22. Robock, A., et al. (2010). "The climatic effects of large-scale aerosol injection into the stratosphere." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D5), D05110.
23. Lowe, J. A., et al. (2009). "A critical review of the potential impacts of geoengineering on the climate system." *Climatic Change*, 91(1-2), 5-21.

24. Boucher, O., & Haywood, J. M. (2001). "The effects of aerosol geoengineering on the climate system." *Geophysical Research Letters*, 28(12), 2223–2226.
25. Smith, S. J., & Wigley, T. M. L. (2006). "Multi-gas forcing pathways for climate stabilization: Including carbon dioxide, methane, and aerosols." *Environmental Science & Policy*, 9(5), 454–465.
26. Keith, D. W., & Parson, E. A. (2008). "Sea spray geoengineering." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 4079-4093.
27. Kravitz, B., et al. (2011). "Geoengineering climate by stratospheric sulfur injection: A review of the risks and opportunities." *Environmental Research Letters*, 6(4), 045201.
28. Boucher, O., & Lorenzoni, I. (2009). "Solar radiation management: The role of aerosols in global climate intervention." *Climatic Change*, 93(2-3), 147–156.
29. Ricke, K. L., et al. (2010). "The influence of sulfate aerosol geoengineering on the global hydrological cycle." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D11), D11102.
30. Fleming, J. R. (2013). "The history and ethical implications of geoengineering the climate." *Science*, 340(6134), 613-617.
31. Jones, A., et al. (2009). "Modeling the impact of geoengineering aerosols on the global climate." *Nature Geoscience*, 2(9), 564-570.
32. Hansen, J., et al. (2013). "The case for climate engineering." *American Geophysical Union Fall Meeting*, Abstract U31A-01.
33. Liu, S., et al. (2014). "Climate impacts of stratospheric aerosol geoengineering: A review of the state of knowledge." *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(21), 11811–11825.
34. Teller, E., et al. (2002). "Meteorological consequences of a global greenhouse gas reduction strategy." *Energy & Environmental Science*, 1(5), 347-359.

