

Зміна Клімату Докази & Причини



Видання 2020

Огляд від Лондонського Королівського товариства та Національної Академії Наук США



THE
ROYAL
SOCIETY

ПЕРЕДМОВА

ЗМІНА КЛІМАТУ Є ОДНИМ З ВИЗНАЧАЛЬНИХ ПИТАНЬ НАШОГО ЧАСУ. Наразі, на підставі різноманітних доказів, є очевиднішим ніж будь-коли: людина змінює Земний клімат. Атмосфера й океани нагрілися, що супроводжується підвищенням рівня моря, сильним зменшенням арктичного морського льоду та іншими пов'язаними з кліматом змінами. Вплив кліматичних змін на людину та довкілля стає дебільш очевидним. Безпрецедентні повені, спека й пожежі завдали мільярдних збитків. Середовища існування зазнають швидких змін у відповідь на зміну температури та режиму опадів.

Лондонське Королівське Товариство та Національна Академія Наук США, з їхніми подібними місіями поширення науки на користь суспільству та інформування про гострі політичні дебати, видали працю під назвою “Climate Change: Evidence and Causes in 2014”. Вона була написана й перевірена Британсько-Американською командою провідних кліматологів. Це нове видання, підготовлене тим самим авторським складом, було доповнене найновішими даними про клімат і науковими аналізами, які зміцнюють наше розуміння викликаних людиною кліматичних змін.

Докази очевидні. Тим не менш, через природу науки, не кожна деталь зазвичай повністю встановлена чи то визначена. Також не були надані відповіді на всі відповідні питання. По всьому світу збираються наукові докази. Деякі речі стають прозорішими, виникають нові ідеї. Наприклад період поступового потепління протягом 2000-ми та ранніми 2010-ми закінчився драматичним стрибком температури вгору між 2014 та 2015 роками. Площа морського льоду в Антарктиді, що тільки збільшувалася з часом, почала зменшуватися в 2014 році, сягнувши рекордно низьких показників у 2017, які залишаються незмінними. Ці та інші останні спостереження були залучені до дискусійних питань розглянутих у цьому буклеті.

Заклики до дій стають лише гучнішими. Згідно з Дослідженням про Сприйняття Глобальних Ризиків 2020 (Global Risks Perception Survey 2020) на Світовому Економічному Форумі, зміна клімату та пов'язані проблеми довкілля увійшли в топ-5 глобальних ризиків, які, ймовірно, будуть актуальними протягом наступних 10 років. Однак міжнародному співтовариству все ще потрібно подолати довгий шлях, аби показати великі амбіції щодо пом'якшення наслідків зміни клімату, адаптації до неї, та інших шляхів боротьби.

Наукова інформація є життєво важливим компонентом для суспільства, щоб приймати обдумані рішення щодо зменшення масштабів кліматичних змін та пристосування до їхнього впливу. Даний буклет служить ключовим документом для тих, хто ухвалює важливі рішення, політиків, освітян та інших шукачів авторитетних відповідей про поточний стан науки про зміну клімату.

Ми вдячні, що 6 років тому, під керівництвом Доктора Ральфа Дж. Цицерона, колишнього Президента Національної Академії Наук, та Сера Пола Нерса, колишнього Президента Королівського Товариства, ці дві організації об'єднали свої зусилля, аби видати високоякісний огляд науки про кліматичні зміни. Як теперішні Президенти цих двох організацій, ми раді запропонувати вам оновлення цього матеріалу, що підтримується щедрістю родини Цицерон.

Марша Макнатт

Президентка Національної
Академії Наук

Венкі Рамакрішнан

Президент Королівського
Товариства

ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ЧИТАННЯ

Для більш детального ознайомлення тем, зазначених у цьому документі (включно з посиланнями на основні оригінальні дослідження), дивіться:

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [<https://www.ipcc.ch/srocc>]
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM), 2019: *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda* [<https://www.nap.edu/catalog/25259>]
- Royal Society, 2018: *Greenhouse gas removal* [<https://raeng.org.uk/greenhousegasremoval>]
- U.S. Global Change Research Program (USGCRP), 2018: *Fourth National Climate Assessment Volume II: Impacts, Risks, and Adaptation in the United States* [<https://nca2018.globalchange.gov>]
- IPCC, 2018: *Global Warming of 1.5°C* [<https://www.ipcc.ch/sr15>]
- USGCRP, 2017: *Fourth National Climate Assessment Volume I: Climate Science Special Reports* [<https://science2017.globalchange.gov>]
- NASEM, 2016: *Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change* [<https://www.nap.edu/catalog/21852>]
- IPCC, 2013: *Fifth Assessment Report (AR5) Working Group 1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>]
- NRC, 2013: *Abrupt Impacts of Climate Change: Anticipating Surprises* [<https://www.nap.edu/catalog/18373>]
- NRC, 2011: *Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts Over Decades to Millennia* [<https://www.nap.edu/catalog/12877>]
- Royal Society 2010: *Climate Change: A Summary of the Science* [<https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2010/climate-change-summary-science>]
- NRC, 2010: *America's Climate Choices: Advancing the Science of Climate Change* [<https://www.nap.edu/catalog/12782>]

Велика частина оригінальних даних, які лежать в основі наукових висновків, що обговорюються тут, доступні за посиланнями:

- <https://data.ucar.edu/>
- <https://climatedataguide.ucar.edu>
- <https://iridl.ldeo.columbia.edu>
- <https://ess-dive.lbl.gov/>
- <https://www.ncdc.noaa.gov/>
- <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- <http://scrippsco2.ucsd.edu>
- <http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/>



NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES

THE
ROYAL
SOCIETY

Національна Академія Наук (НАН) була створена для надання порад Сполученим Штатам з наукових і технічних питань, коли Президент Лінкольн підписав відповідний акт у 1863 році. Національна Наукова Рада, операційна структура Національної Академії Наук та Національної Академії Інженерії, видавала безліч звітів щодо причин і можливих реакцій на зміну клімату. Інформація щодо зміни клімату від Національної Наукової Ради доступна за посиланням: nationalacademies.org/climate.

Королівське Товариство - це самоврядне товариство найвидатніших вчених з усього світу. Його члени представлені всіма галузями науки, інженерії та медицини. Також це Національна Академія Наук Великої Британії. Основною метою товариства, як це згадується у його засновницьких уставах 1660-х років, є визнання, підтримка та поширення досконалості в науці, та заохочення розвитку та використання науки на користь людства. Більше інформації про роботу Товариства в галузі зміни клімату доступно за посиланням: royalsociety.org/policy/climate-change



NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES

THE
ROYAL
SOCIETY

РЕЗЮМЕ 2

ЗМІНА КЛІМАТУ П&В

- 1 Чи теплішає клімат? 3
- 2 Звідкіля вчені знають, що останні зміни клімату викликані здебільшого людською діяльністю? ... 5
- 3 CO₂ вже природньо є в атмосфері, чому викиди, спричинені людською діяльністю значні? 6
- 4 Яку роль в зміні клімату відіграло сонце за останні десятиліття? 7
- 5 Зміни в вертикальній структурі температури атмосфери,— від поверхні й до стратосфери —говорять нам про причини недавніх змін клімату? 8
- 6 Клімат завжди змінюється. Чому його зміна повинна турбувати? 9
- 7 Поточний рівень концентрації CO₂ в атмосфері є найбільшим за всю історію Землі?..... 9
- 8 Чи можливо, що збільшення кількості CO₂ не призводитиме до подальшого потепління? 10
- 9 Чи змінюється швидкість потепління із десятиліттями? 11
- 10 Чи означає сповільнення потепління в періоді між 2000-2010-ми, що зміна клімату більше не відбувається? 12

ОСНОВИ ЗМІНИ КЛІМАТУ В1–В8

ЗМІНА КЛІМАТУ П&В (продовження)

- 11 Якщо світ нагрівається, чому часто зима та літо все ще дуже холодні? 13
- 12 Чому арктичний морський лід тоне, водночас як антарктичний лід зазнає змін? 14
- 13 Як зміна клімату впливає на силу та частоту повеней, посух, ураганів і торнадо? 15
- 14 Як швидко росте морський рівень води? 16
- 15 Що таке кислотність океану і чому це важливо? 17
- 16 Якою є впевненість вчених щодо нагрівання Землі протягом наступного століття? 18
- 17 Чи є приводом для занепокоєння зміна клімату на кілька градусів? 19
- 18 Що роблять вчені для усунення ключових невизначеностей нашому розумінні кліматичної системи? 19
- 19 Чи є катастрофічні сценарії про точки неповернення, такі як "зупинка Гольфстріму" та вивільнення метану з Арктики, причиною для турботи? 21
- 20 Якби викиди парникових газів зупинилися, повернувся б клімат до свого стану, яким він був 200 років тому? 22

ВИСНОВОК 23

ПОДЯКИ 24

ПАРНИКОВІ ГАЗИ такі як діоксид вуглецю (CO_2) поглинають тепло (інфрачервоне випромінювання), яке випромінюється з поверхні Землі. Збільшення концентрації цих газів у атмосфері спричиняє нагрівання Землі, накопичуючи ще більше тепла. Людська діяльність - особливо спалювання паливних копалин з початку Промислового перевороту збільшила концентрацію CO_2 в атмосфері більше ніж на 40%, понад половина збільшення припала на період після 1970 року. З 1900 року загальна середня температура земної поверхні зросла приблизно на 1°C (1.8°F). Це супроводжувалося нагріванням океану, підняттям рівня моря, сильним зменшенням арктичного морського льоду, поширенням збільшення частоти та інтенсивності спеки, а також багатьма іншими пов'язаними кліматичними ефектами. Значна частина тепла виділилася протягом останніх п'яти сторіч. Детальні аналізи показали, що потепління протягом цього періоду переважно є результатом збільшення концентрації CO_2 та інших парникових газів. Продовження викидів цих газів призведе до подальшої зміни клімату, включаючи значні зростання глобальної середньої температури поверхні та важливі зміни в регіональному кліматі. Потужність і хронологія цих змін будуть залежати від багатьох факторів, втім сповільнення та прискорення потепління, що триває десятиліття або більше, продовжуватиме відбуватися. Однак, довгострокові зміни клімату протягом багатьох десятиліть будуть залежати головним чином від загальної кількості CO_2 та інших парникових газів, викинутих унаслідок людської діяльності.



1

Чи теплішає клімат?

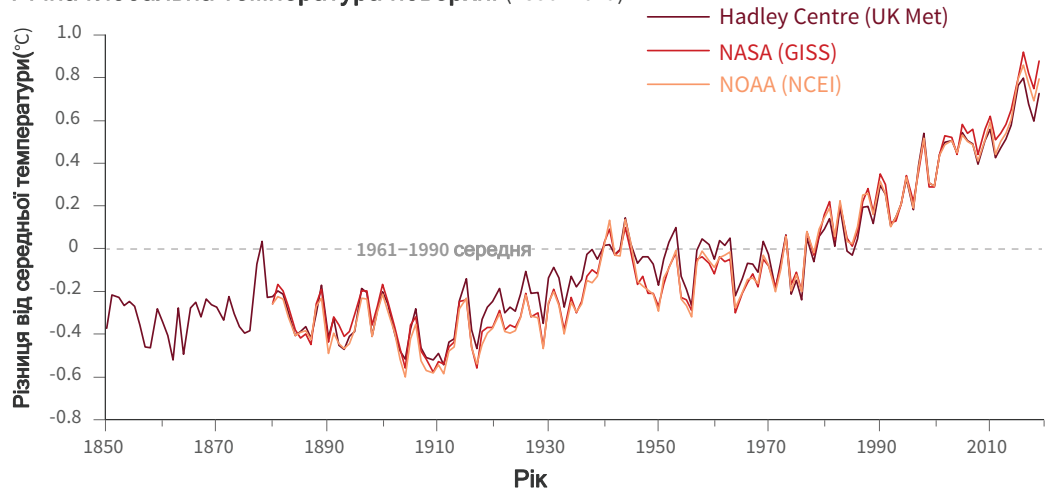
Так. Середня температура повітря на поверхні Землі зросла приблизно на 1 °C (1.8 °F) з 1900 року, і понад половина з цього зростання відбувалася з середини 1970-х років [Додаток 1а]. Широкий спектр інших спостережень (таких як зменшення обсягу арктичного морського льоду та збільшення температури океану) та індикації з природного світу (такі як переміщення до полюсів видів риб, ссавців, комах тощо, що реагують на температуру) разом надають переконливі докази глобального потепління на усій планеті.

Найочевиднішими доказами зігрівання поверхні є широко поширені термометричні записи, які в деяких місцях збиралися з кінця 19th століття. Сьогодні за температурою спостерігають в тисячах місць як на суходолі, так і на поверхні океану. Непрямі дослідження зміни температури, отримані з джерел, таких як зрізи дерев та льодові ядра, допомагають розмістити недавні зміни температури в хронології минулого. З точки зору середньої температури поверхні Землі, ці непрямі дослідження показують, що період з 1989 по 2019 рік був найімовірніше найтеплішим 30-річним періодом за понад 800 років; останнє десятиліття, з 2010 по 2019 рік, є найтеплішим десятиліттям в інструментальному записі (зробленим на основі даних класичного термометра) до цього часу (з 1850 року).

Широкий спектр інших спостережень надає більш комплексне уявлення про потепління в усій системі клімату. Наприклад, нижні шари атмосфери та верхні шари океану також прогріваються, сніг і льодовий покрив зменшуються на північній півкулі, льодовик Гренландії тане, а рівень моря піднімається [Додаток 1b]. Ці вимірювання здійснюються за допомогою різноманітних систем спостереження, які розташовані на землі, в океані та в космосі, що забезпечує додаткову впевненість у реальності глобального потепління клімату Землі.

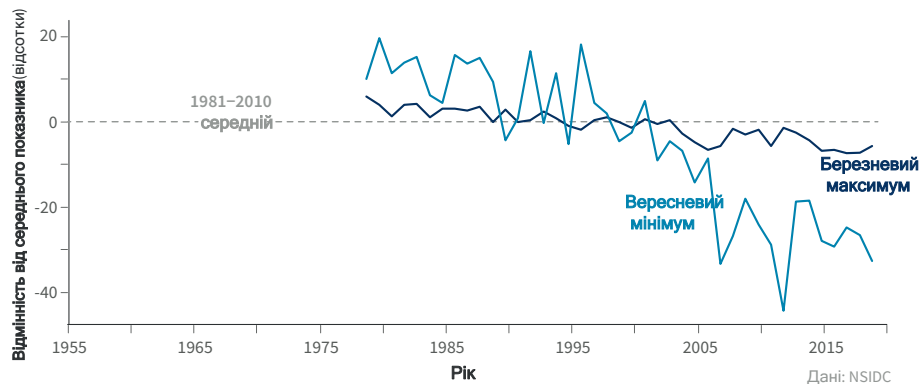
Додаток 1А Середня глобальна температура поверхні Землі підвищилася, як показано на графіку, який відображає комбіновані вимірювання на суходолі та у водах океану з 1850 по 2019 рік, отримані з трьох незалежних аналізів наявних наборів даних. Зміни температури показані у співвідношенні з глобальною середньою поверхневою температурою за період 1961-1990 років. *Джерело: NOAA Climate.gov; data from UK Met Office Hadley Centre (бордовий), US National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies (червоний), and US National Oceanic and Atmospheric Administration National Centers for Environmental Information (помаранчевий).*

Річна глобальна температура поверхні (1850–2019)

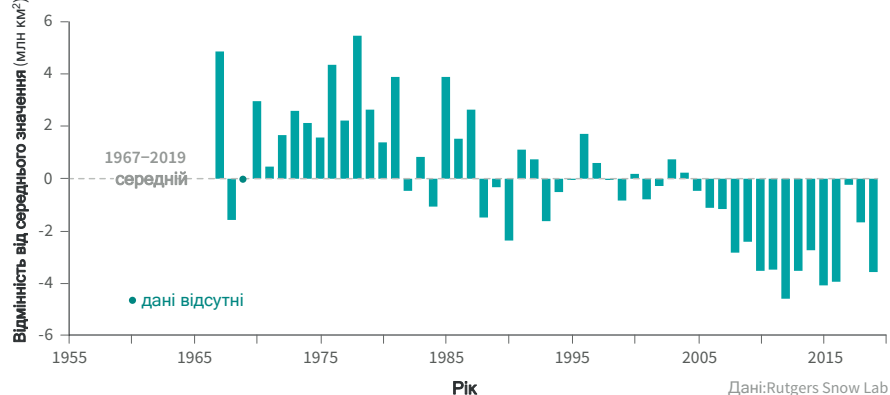


Додаток 1В. Додатково до записів температури поверхні, існує величезна кількість спостережень, які підтверджують зміни в кліматі Землі. Наприклад, додатковим доказом тенденції потепління є раптове зменшення площі арктичного морського льоду у літній мінімум (який відбувається у вересні), зменшення снігового покриву в червні на північній півкулі, зростання вмісту тепла у верхніх шарах (від 700 метрів або 2300 футів) світового океану (відносно середнього значення за 1955-2006 роки) і підйом рівня моря на планеті.
Джерело: NOAA Climate.gov

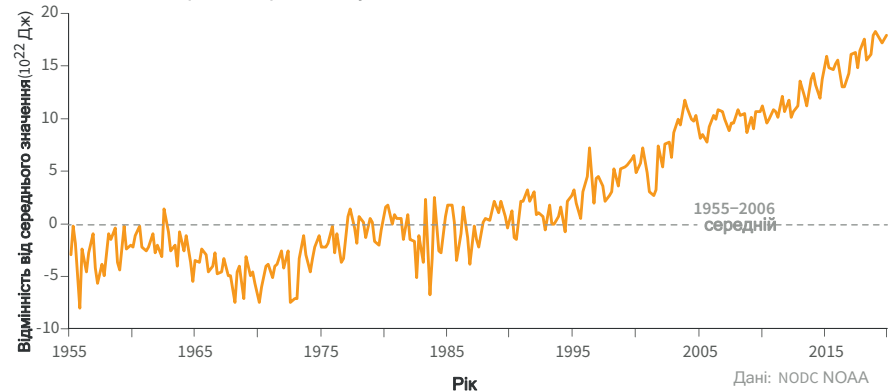
Площа арктичного морського льоду взимку та влітку (1979–2019)



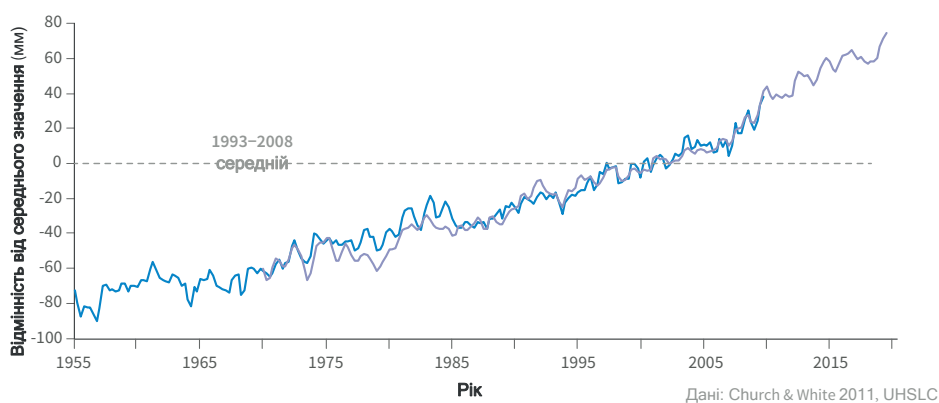
Червневий сніговий покрив у північній півкулі (1967–2019)



Тепловий вміст верхніх шарів океану (1955–2019)



Глобальний рівень води (1955-2019)



2

Звідкіля вчені знають, що останні зміни клімату викликані здебільшого людською діяльністю?

Вчені знають, що недавні зміни клімату здебільшого спричинені людською діяльністю завдяки розумінню основних фізичних законів, порівнянню спостережень з моделями і визначенню характерних ознак детальних змін клімату, викликаних під дією різних людських та природних впливів.

З середини 1800-х років вчені знають, що CO₂ є одним з основних парникових газів, важливих для енергетичного балансу Землі. Прямі вимірювання CO₂ в атмосфері та повітрі, що було взято із льоду, показують наступне: концентрація атмосферного CO₂ зросла більш ніж на 40% з 1800 по 2019 рік. Вимірювання різних форм вуглецю (ізотопів, див. Питання 3) вказують на те, що це збільшення зумовлене людською діяльністю. Концентрація інших парникових газів (особливо метану та діоксид азоту) також збільшується в результаті людської діяльності. Спостережений глобальний підйом середньої температури поверхні Землі з 1900 року відповідає детальним розрахункам впливів спостережуваного зростання парникових газів в атмосфері (та інших змін, зумовлених людьми).

Різні впливи на клімат мають різні характерні ознаки в кліматичних записках. Ці унікальні характерні ознаки легше виявити, виходячи за межі одного числа (наприклад, середньої температури поверхні Землі) і, замість цього, звертаючись до географічних і сезонних змін клімату. Отримані шляхом спостереження закономірності зігрівання поверхні, зміни температури в атмосфері, зростання вмісту тепла в океані, збільшення атмосферної вологості, підйом рівня моря та збільшене танення льоду на суходолі та в морі також відповідають закономірностям, які вчені очікують побачити внаслідок діяльності людини (див. Питання 5).

Очікувані зміни в кліматі базуються на нашому розумінні того, як парникові гази утримують тепло. Фундаментальне розуміння фізики парникових газів і дослідження, засновані на аналізі закономірностей разом показують, що природне пояснення нещодавніх зафіксованих змін у кліматі є недостатнім. Природні причини включають зміни в сонячній активності, орбіту Землі навколо Сонця, вулканічні виверження та внутрішні коливання в кліматичній системі (такій як Ель-Ніньйо і Ла-Нінья). Розрахунки з використанням кліматичних моделей (див. інформаційний блок, стор. 20) використовувалися для симуляції того, як би змінилася глобальна температура, за умов впливу на кліматичну систему лише природних факторів. Ці симуляції видають незначне нагрівання поверхні або навіть легке охолодження протягом 20-го століття і впродовж 21-го століття. Тільки тоді, коли моделі включають вплив людини на склад атмосфери, отримані зміни температури відповідають наявним змінам.

3

CO₂ вже природньо є в атмосфері, чому викиди, спричинені людською діяльністю значні?

Видобуток вуглеводнів з надр землі , а також їх спалення (з викидами CO₂ в атмосферу) з метою отримання енергії, значно порушили природний вуглецевий цикл.

У природі CO₂ безперервно циркулює між атмосферою, рослинами і тваринами завдяки фотосинтезу, диханню та розкладанню, а також між атмосферою та океаном завдяки газообміну. Зовсім невелика кількість CO₂ (приблизно 1% від рівня викидів від спалювання кам'яного вугілля) викидається під час вивержень вулканів. Це урівноважується відповідною кількістю, яка зникає за рахунок хімічного вивітрювання гірських порід.

Рівень CO₂ в 2019 році був більш ніж на 40% вищим, ніж яким він був у 19 столітті. Більша частина CO₂ виділилася після 1970-го року, , приблизно з часу прискореного глобального споживання енергії.

Вимірювані зниження в загальній частці вуглекислого газу інших форм вуглецю (ізотопи ¹⁴C і ¹³C) та незначне зниження концентрації атмосферного кисню (спостереження за якими ведуться з 1990) свідчать про те, що ріст вмісту CO₂ переважно пов'язаний зі згоранням паливних копалин (які містять низьку частку ¹³C і не містять ¹⁴C) Вирубка лісів та інші зміни у використанні землі також вивільнили вуглець з біосфери (живого світу), де він зазвичай знаходиться десятиліттями або століттями.

Додатковий CO₂ від спалювання паливних копалин та вирубки лісів порушив баланс вуглецевого циклу, бо ж природні процеси, які могли б відновити баланс, є надто повільними порівняно з темпами додавання CO₂ в атмосферу людиною. Як результат, маємо значну частину CO₂, що була викинута внаслідок людської діяльності, яка накопичується в атмосфері, де певна його частина залишиться не просто на десятиліття чи то століття, а на тисячі років. Порівняння з рівнями CO₂ виміряних в атмосферному повітрі , що витягнуте з льодових ядер, показує, що поточні концентрації значно вищі, ніж вони були щонайменше 800 000 років тому (див. Питання 6).



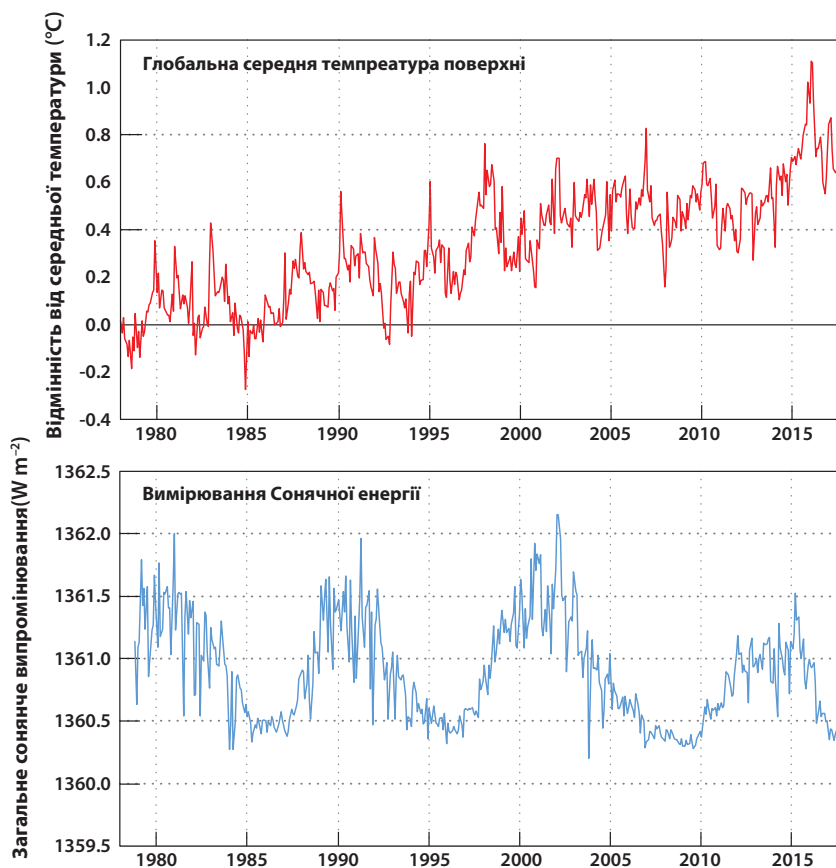
4

Яку роль в зміні клімату відіграло сонце за останні десятиліття?

Сонце є основним джерелом енергії, яке приводить в дію кліматичну систему Землі, втім його активність мало вплинула на зміну клімату за останні десятиліття. Прямі супутникові вимірювання з кінця 1970-х років не виявили збільшення сонячної активності, тоді як середні температури поверхні Землі зросли [Додаток 2].

Для періодів до початку супутникових вимірювань знання про зміни на Сонці були менш точними, оскільки їх виводять з непрямих джерел, включаючи кількість сонячних плям і кількість певних форм (ізопів) атомів вуглецю або берилію, чиє вироблення в атмосфері Землі залежить від змін на Сонці. Існують докази того, що 11-річний сонячний цикл, під час якого варіюється випромінювання енергії Сонця на приблизно 0,1%, може впливати на концентрацію озону, температуру й вітри в стратосфері (шари атмосфери вище тропосфери, який зазвичай знаходиться на висоті від 12 до 50 км над поверхнею Землі, в залежності від широти і пори року). Ці зміни в стратосфері можуть трохи впливати на клімат поверхні протягом 11-річного циклу. Однак наявні приклади не вказують на виразні довготривалі зміни в випромінюванні енергії Сонцем за останнє століття, протягом якого збільшення концентрації CO₂, зумовлене людиною, носило домінуючий характер стосовно довгострокового зростання глобальної температури поверхні. Додаткові обґрунтування того, що поточне зігрівання не є наслідком змін сонячної активності, можна знайти в показниках температури на різних висотах в атмосфері (див. Питання 5).

Додаток 2. Вимірювання Сонячної енергії, що потрапляє на Землю, не показують значного збільшення сонячного впливу протягом останніх 40 років, тому воно не носить відповідальності за потепління протягом цього періоду. Дані показують лише невеликі періодичні зміни амплітуди, пов'язані з 11-річним циклом Сонця.
Джерело: TSI data from Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, Switzerland, on the new VIRGO scale from 1978 to mid-2018; temperature data for same time period from the HadCRUT₄ dataset, UK Met Office, Hadley Centre.



5

Зміни в вертикальній структурі температури атмосфери,— від поверхні до стратосфери – говорять нам інформацію про причини недавніх змін клімат?

Нагрівання нижніх шарів атмосфери та охолодження верхніх, разом говорять нам про основні причини зміни клімату і показують, що природні фактори самі по собі не можуть пояснити спостережувані зміни.

У раних шестидесятих результати математичних та фізичних моделей кліматичної системи вперше довели, що викиди CO₂, які виникають внаслідок людської діяльності, призведуть до підвищення температури нижніх шарів атмосфери (тропосфери) та охолодження вищих (стратосфери). З іншого боку, збільшення кількості енергії, що дає Сонце, призведе до зігрівання як тропосфери, так і всієї вертикальної протяжності стратосфери. В той час було недостатньо даних спостереження для перевірки цих передбачень, але вимірювання температури з метеозондів і супутників відтоді підтвердили ці попередні прогнози. Зараз відомо, що наявна закономірність зігрівання тропосфери і охолодження стратосфери протягом останніх 40 років цілком узгоджується із симуляціями комп'ютерних моделей, які включають в себе збільшення CO₂ та зменшення стратосферного озону, що зумовлені діяльністю людини. Виявлена закономірність не узгоджується з виключно природними чинниками зміни клімату, хай то змінами сонячної активності, вулканічною активністю або природними змінами клімату, такими як Ель-Ніньйо і Ла-Нінья.

Незважаючи на узгодження між глобальними послідовностями змін температури атмосфери, що моделюються, і спостереженими, все ж існують деякі відмінності. Найбільш помітна різниця спостерігається в тропіках, де на даний момент моделі показують більші показники нагрівання тропосфери, ніж спостерігається, і в Арктиці, де фактичне нагрівання тропосфери більше, ніж у більшості моделей.



6

Клімат завжди змінюється. Чому його зміна повинна турбувати?

Усі відчутні зміни клімату, включаючи природні, є руйнівними. Минулі зміни призвели до вимирання багатьох видів, міграції населення та виразних змін поверхні землі та океанській циркуляції. Темп поточних змін клімату є швидшим, ніж у більшості минулих подій, що робить процес пристосування для людського поспільства та природного світу складнішим.

Найбільші глобальні коливання клімату в останній геологічний період Землі - це цикли льодовикових періодів (див. Інфо-додаток стор. В4), які включають холодні льодовикові періоди, що чергуються з коротшими періодами потепління [Додаток 3].

Останні декілька з цих природних циклів повторювались приблизно кожні 100 000 років. Вони головним чином зумовлені повільними змінами в орбіті Землі, які змінюють розподіл сонячної енергії залежно від широти та пори року на Землі. Ці орбітальні зміни є незначними протягом останніх кількох сотень років і самі по собі є недостатніми, щоб викликати спостережувані після промислової революції зміни температури, чи то впливати на весь світ. Однак під призою льодовикових масштабів ці повільні орбітальні зміни призвели до змін в обсязі льодового покриву і кількості CO₂ та інших парникових газів, що в свою чергу дало поштовх для початкової зміни температури.

Нещодавні оцінки збільшення глобальної середньої температури з кінця останнього льодовикового періоду становлять 4-5 °C (7-9 °F). Ця зміна відбувалася протягом близько 7000 років, починаючи приблизно з 18000 років тому. Рівень CO₂ зріс більше ніж на 40% всього лише за останні 200 років, значна частина росту припадає на період після 1970-х років. Усе це сприяє зміні енергетичного балансу планети через вплив людей, що наразі призвело до нагрівання Землі близько на 1 °C (1.8 °F). Якщо підйом рівня CO₂ не обмежити, то до кінця цього століття або невдовзі після цього можна очікувати потепління такої ж величини, яка могла бути після льодовикового періоду. Швидкість нагрівання зараз перевищує в більше ніж десять разів швидкість потепління в кінці льодовикового періоду, це найшвидша відома природна стійка зміна на глобальному масштабі.

7

Поточний рівень концентрації CO₂ в атмосфері є найбільшим за всю історію Землі?

Рівень атмосферної концентрації CO₂ в наші дні навряд чи мав місце протягом останнього мільйона років, під час якого розвивалася сучасна людина і формувалися нації. Однак в більш віддаленому минулому Землі нам відомо про вищі показники рівня CO₂ (багато мільйонів років тому), коли палеокліматичні та геологічні дані свідчать, що температура та рівень моря були колосально вищими, ніж в наші дні.

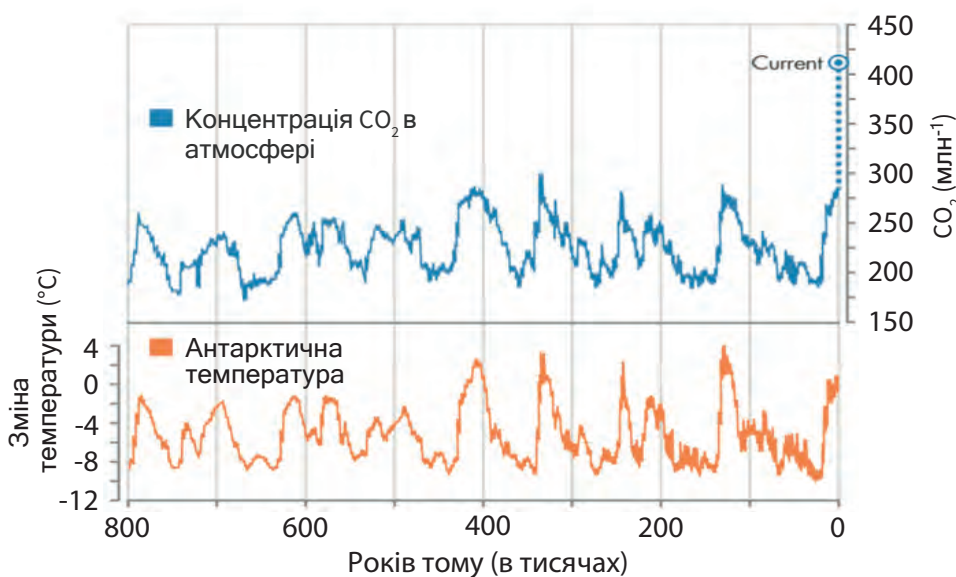
Аналіз повітря в крижаних ядрах показує, що протягом останніх 800 000 років до 20 століття, концентрація атмосферного CO₂ знаходилась у діапазоні від 170 до 300 мільйонних частинок (млн⁻¹), що робить останній швидкий підйом до більше ніж 400 млн⁻¹ протягом 200 років особливо вражаючим [Додаток 3]. Протягом льодовикових циклів, що минули за останні 800 000 років, гази CO₂ та метан виступали важливими посилювачами змін клімату, спричинених переминами орбіти Землі навколо Сонця. Так, коли Земля нагрівалася після останнього льодовикового періоду, температура

продовження

Додаток 3. Дані з крижаних кернів були використані для реконструкції температур та концентрації атмосферного CO₂ в Антарктиці протягом останніх 800 000 років. Температура базується на вимірюваннях ізотопного складу води в крижаному керні "Купол С". CO₂ вимірюється у повітрі, замкненому в льоді, і представляє собою комбінацію крижаних кернів "Купол С" і "Восток". Поточна концентрація CO₂ (сині крапки) базується на атмосферних вимірюваннях. Циклічний характер варіацій температури складає льодовикові/міжледовикові цикли. Протягом цих циклів зміни концентрацій CO₂ (синя лінія) залежні від змін температури (помаранчева лінія). Як показує запис, недавнє зростання концентрації атмосферного CO₂ є безпрецедентним за останні 800 000 років. Рівень атмосферного CO₂ перевищив 400 млн⁻¹ у 2016 році, а середня концентрація у 2019 році становила більше 411 млн⁻¹. *Джерело: Based on figure by Jeremy Shakun, data from Lüthi et al., 2008 and Jouzel et al., 2007.*

і рівень CO₂ почали підвищуватися приблизно одночасно і продовжували зростати паралельно в періоді приблизно з 18 000 до 11 000 років тому. Зміни в температурі океану, в його циркуляції разом з хімією та біологією, призвели до викиду CO₂ в атмосферу, що разом з іншими чинниками сприяло ще більшому нагріванню Землі.

Для давніших геологічних періодів показники концентрації CO₂ та температури були визначені за допомогою непрямих методів. Завдяки цим методам було встановлено, що концентрація CO₂ востаннє наближалася до 400 млн⁻¹ приблизно 3-5 мільйонів років тому, в період, коли глобальна середня температура поверхні є в 2-3,5 °C вище, ніж в "допромисловий" період. Близько 50 мільйонів років тому рівень CO₂ міг досягати 1000 млн⁻¹, а глобальна середня температура ймовірно була на 10°C тепліше, ніж сьогодні. За таких умов, на Землі майже не було криги, а рівень моря був принаймні на 60 метрів вище, ніж тепер.



8

Чи можливо, що збільшення кількості CO₂ не призводитиме до подальшого потепління?

Ні. Збільшення кількості CO₂ спричинить подальше підвищення температури. При збільшенні концентрації атмосферного вуглецю, надлишковий вуглекислий газ не буде так сильно утримувати енергію Землі, але температура поверхні всеодно зростатиме.

Наше розуміння фізики, завдяки якій CO₂ впливає на енергетичний баланс Землі, підтверджується лабораторними вимірюваннями, а також детальними супутниковими та наземними спостереженнями випромінювання та поглинання інфрачервоної енергії атмосферою. Парникові гази поглинають частину інфрачервоної енергії, яку випромінює Земля, у так званих смугах більш сильного поглинання, які знаходяться на певних довжинах хвиль. Різні гази поглинають енергію на різній довжині хвиль. Вуглець має "смугу найсильнішого утримання" тепла з центром на довжині хвилі 15 мікрометрів (мільйонна метра), що має поглинання на декілька мікрометрів з обох сторін. Також існує багато слабших смуг поглинання. Зі збільшенням концентрації CO₂, поглинання у центрі сильної смуги вже настільки інтенсивне, що воно не відіграє ролі у спричиненні додаткового потепління. Однак, більшість енергії поглинається в слабших смугах та далеко від центру сильної смуги, що призводить до додаткового нагрівання поверхні та шару нижньої атмосфери.

9

Чи змінюється швидкість потепління із десятиліттями?

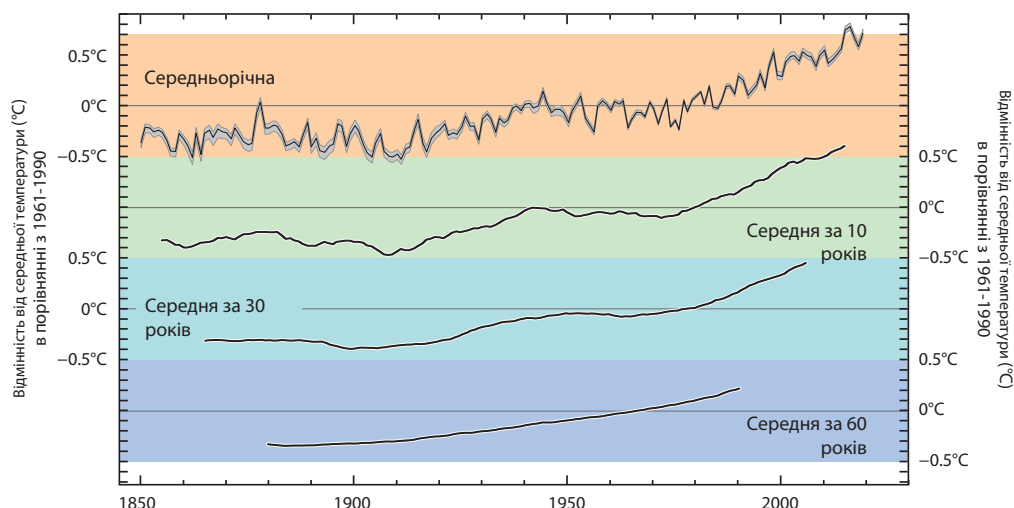
Так. Спостережувана швидкість потепління змінюється з року в рік, з десятиліття в десятиліття та з місця на місце, як і повинно бути при правильному розумінні кліматичної системи. Деякі недовготривалі перемини в основному зумовлені природними чинниками і не суперечать нашому основному баченню того, що довгострокова закономірність потепління в основному обумовлена людським впливом на атмосферні рівні концентрації CO₂ та інших парникових газів.

Тим часом, коли концентрація вуглекислого газу стабільно зростає в атмосфері, що призводить до поступового потепління поверхні Землі, багато природних факторів моделюють це довгострокове потепління. Великі вулканічні виверження збільшують кількість дрібних частинок у стратосфері. Ці частинки відбивають сонячне світло, що призводить до короткострокового охолодження поверхні, що воно зазвичай триває два-три роки, після чого вона повернеться до попереднього стану. З часом, циркуляція океану та процес змішування змінюються природним чином, спричиняючи коливання температури поверхні моря, а також зміни швидкості транспортування тепла на більшу глибину. Наприклад води тропічної частини Тихого океану переміщуються між теплим Ель-Ніньйо та прохолоднішим Ла-Нінья в часових інтервалах від двох до семи років. Вчені досліджують багато різних типів кліматичних варіацій, таких як ті, що мають десятилітні й мультидесятилітні інтервали в Тихому океані та Північній частині Атлантичного. Кожен тип варіації має свої унікальні характеристики. Ці океанічні варіації пов'язані зі значними регіональними та глобальними змінами в температурних та опадових режимах, які спостерігаються під час досліджень.

Поступове потепління з десятиліття на десятиліття також може залежати від людських факторів, таких як зміни викидів парникових газів та аерозолів (повітряних часток, які можуть мати як тепловий, так і охолоджувальний ефекти) від ТЕЦ та інших джерел забруднення.

Ці варіації в тенденції температури чітко видно на моніторинговому записі температури [Додаток 4]. Короткострокові природні кліматичні варіації (зміни) також можуть впливати на довгостроковий сигнал кліматичних змін, зумовлених людиною, і навпаки, тому що кліматичні зміни в різних місцях і часових проміжках можуть взаємодіяти між собою. Саме тому проєкції кліматичних змін будуються з використанням кліматичних моделей (див. Інфо-додаток, стор. 20), які можуть враховувати багато різних типів кліматичних варіацій і їх взаємодії. Аргументовані висновки про кліматичні зміни, викликані діяльністю людини, повинні базуватися на тривалому підході, використовуючи дані, що охоплюють багато десятиліть.

Додаток 4. Кліматична система природно змінюється з року в рік, з десятиліття в десятиліття. Для отримання надійних висновків про кліматичні зміни, спричинені діяльністю людини, зазвичай використовуються записи з тривалістю від кількох десятиліть і більше. Обчислення "поточного середнього" на цих тривалих проміжках дозволяє легше спостерігати довгострокові тенденції. Для глобальної середньої температури за період 1850-2019 років (використовуючи дані від UK Met Office Hadley Centre відносно середнього значення 1961-90 років) показані графіки (верхній) середнього значення для середніх даних за рік; (2-й графік) середньої річної температури за десять років, розміщених навколо будь-якої визначеної дати; (3-й графік) еквівалентного зображення за 30 років; і (4-й графік) 60-річних середніх значень. Джерело: Met Office Hadley Centre, based on the HadCRUT₄ dataset from the Met Office and Climatic Research Unit (Morice et al., 2012).



10

Чи означає сповільнення потепління в періоді між 2000-2010-ми, що зміна клімату більше не відбувається?

Після дуже теплого року 1998, який настав унаслідок сильного Ель-Ніньйо 1997-98 років, збільшення середньої поверхневої температури уповільнилося, порівняно з попереднім десятиліттям, коли температура швидко росла. Незважаючи на повільніший темп потепління, 2000-і роки були теплішими, ніж 1990-і роки. Обмежений період сповільнення потепління закінчився раптовим стрибком до теплих температур між 2014 і 2015 роками, при чому всі роки з 2015 по 2019 були теплішими за попередні, згідно з інструментальними записами. Недовге сповільнення нагрівання поверхні Землі не заперечує наше розуміння довгострокових змін глобальної температури, що виникають внаслідок антропогенного впливу на парникові гази.

Десятиліття повільного потепління, а також десятиліття прискореного потепління виникають природно в кліматичній системі. Десятиліття, які є холоднішими або теплішими порівняно з довгостроковою тенденцією, спостерігаються за останні 150 років і також відтворюються кліматичними моделями. Через те, що атмосфера зберігає дуже мало тепла, температури на поверхні можуть швидко змінюватися через поглинання тепла в інших частинах кліматичної системи та через зміни зовнішніх впливів на клімат (наприклад, часток, утворених внаслідок вивержень вулканів, які піднялися високо в атмосферу).

Понад 90% тепла, що надійшло до системи Землі протягом останніх десятиліть, поглинають океани; воно дуже повільно проникає в глибокі води. Швидші показники проникнення тепла в глиб океану сповільняють потепління, спостережене на поверхні та в атмосфері, але самі по собі не змінюють довгострокового нагрівання, яке виникає внаслідок певної кількості CO₂. Наприклад, недавні дослідження показують, що під час теплих проявів Ель-Ніньйо деяка кількість тепла виходить з океану в атмосферу; під час же холодних проявів Ла-Нінья тепла більше проникає до глибин океану. Такі зміни відбуваються циклічно протягом десятиліть і більш тривалих періодів. Наприклад, величезний прояв Ель-Ніньйо у 1997-98 роках привів до зростання середньої температури повітря до найвищого рівня в 20 столітті, оскільки океан викинув тепло в атмосферу, переважно в результаті випаровування.

Навіть під час сповільнення зростання середньої поверхневої температури продовжувалася тривала тенденція потепління (див. Додаток 4). Протягом цього періоду, наприклад, були задокументовані рекордні спекотні хвилі в Європі (літо 2003 року), в Росії (літо 2010 року), в США (липень 2012 року) та в Австралії (січень 2013 року). Кожне з останніх чотирьох десятиліть було теплішим за будь-яке попереднє з моменту поширення вимірювань термометром в 1850-х роках. Подальші ефекти потепління проявляються в зростанні вмісту тепла в океанах та зростанні рівня моря, а також в продовженому таненні арктичної морської криги, льодовиків та покриву Гренландії.



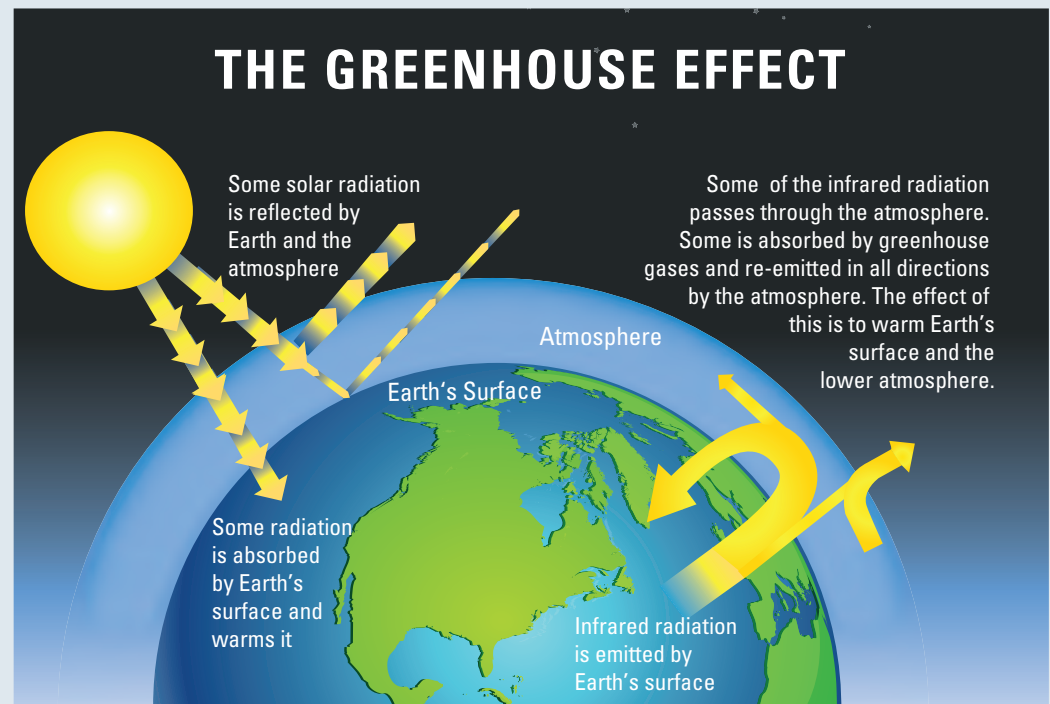
ОСНОВИ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Парникові гази впливають на енергетичний баланс Землі та клімат.

Сонце служить основним джерелом енергії для клімату Землі. Частина вхідного сонячного світла відбивається назад у космос особливо яскравими поверхнями, такими як лід і хмари, а решта поглинається поверхнею та атмосферою. Велика частина цієї поглиненої сонячної енергії повторно випромінюється у вигляді тепла (довгохвильове або інфрачервоне випромінювання). Атмосфера, у свою чергу, поглинає і перевипромінює тепло, частина якого виходить у космос. Будь-яке порушення цього балансу вхідної та вихідної енергії вплине на клімат. Навіть невеликі зміни у випромінюванні енергії Сонцем безпосередньо впливатимуть на цей баланс.

Якби вся теплова енергія, що випромінюється з поверхні, виходила через атмосферу безпосередньо в космос, середня температура поверхні Землі була б на десятки градусів холоднішою, ніж тепер. Парникові гази в атмосфері, включаючи водяну пару, вуглекислий газ, метан і оксид азоту, діють таким чином, аби зробити поверхню набагато теплішою, оскільки вони поглинають і випромінюють теплову енергію в усіх напрямках (в тому числі і вниз), зберігаючи поверхню Землі та тропосферу теплою. [Додаток В1]. Без цього парникового ефекту життя, до якого ми звикли, не розвинулося б на нашій планеті. Додавання в атмосферу більшої кількості парникових газів робить її ще ефективнішою для запобігання виходу тепла в космос. Коли енергії, що виходить, менше, ніж енергії, що надходить, Земля нагрівається, аж поки не встановиться новий баланс.

Додаток В1. Парникові гази в атмосфері, включаючи водяну пару, вуглекислий газ, метан і оксид азоту, поглинають теплову енергію та випромінюють її в усіх напрямках (в тому числі вниз), зберігаючи тепло на поверхні Землі та нижній частини атмосфери. Додавання в атмосферу більшої кількості парникових газів посилює ефект, роблячи поверхню Землі та нижню частину атмосфери ще теплішою. Зображення базується на основі даних US Environmental Protection Agency.



Парникові гази, які викидаються внаслідок діяльності людини, змінюють енергетичний баланс Землі і, отже, її клімат. Людина також впливає на клімат, змінюючи характер поверхні землі (наприклад, вирубуючи ліси для сільського господарства) і через викиди забруднюючих речовин, які впливають на кількість та тип частинок в атмосфері.

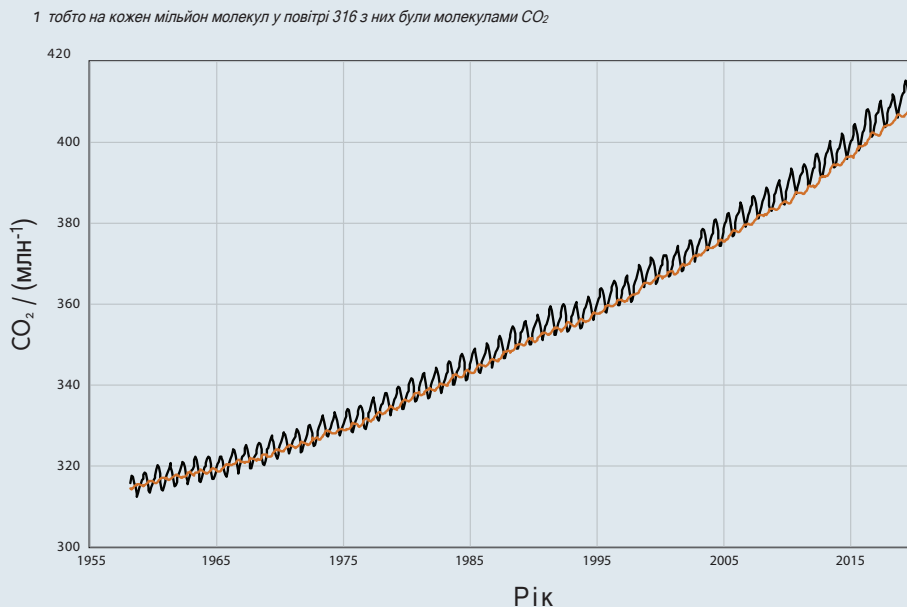
Вчені визначили, що враховуючи всі людські та природні фактори, кліматичний баланс Землі змінився в бік потепління, причому найбільшим фактором є збільшення CO₂.

Людська діяльність додала парникових газів до атмосфери

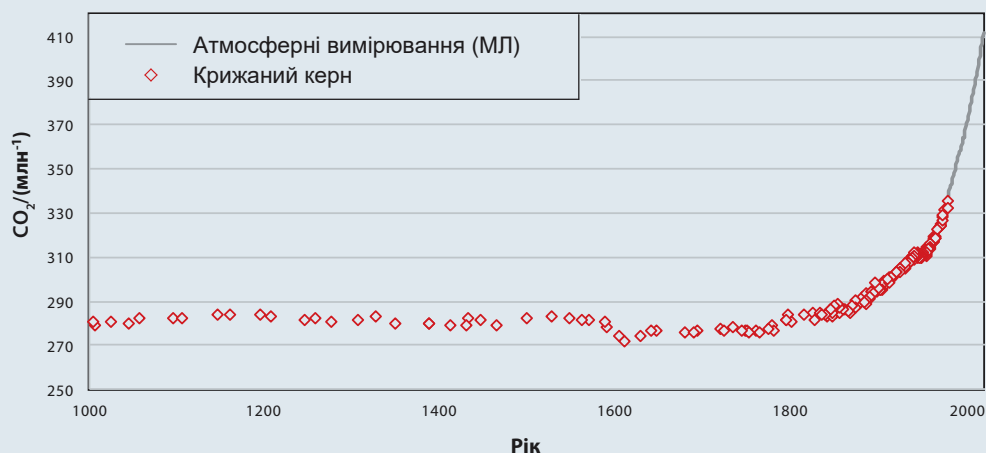
Концентрації вуглекислого газу, метану та оксиду азоту в атмосфері значно зросли після початку промислової революції. У випадку вуглекислого газу середня концентрація, виміряна в обсерваторії Мауна-Лоа на Гавайях, зросла з 316 мільйонних частинок (млн-1)*1 у 1959 році (перший повний рік доступних даних) до понад 411 мільйонних частинок у 2019 році [Додаток В2]. З тих пір такі ж темпи зростання були зафіксовані на багатьох інших станціях по всьому світу. З доіндустріальних часів концентрація CO₂ в атмосфері зросла більш ніж на 40%, метану – більш ніж на 150%, а оксиду азоту – приблизно на 20%. Більше половини збільшення CO₂ припало на період з 1970 року. Збільшення концентрації у повітрі всіх трьох газів сприяє нагріванню Землі, причому збільшення CO₂ відіграє найбільшу роль. Перегляньте сторінку В3, щоб дізнатися про джерела парникових газів, які викидає людина.

Вчені дослідили парникові гази в контексті минулого. Аналіз повітря, що було в льоді, який з часом накопичувався в Антарктиді, показує, що концентрація CO₂

Додаток В2. Виміри атмосферного CO₂ з 1958 року на обсерваторії Мауна-Лоа на Гавайях (чорний) та на Південному полюсі (червоний) показують стабільне щорічне збільшення концентрації атмосферного CO₂. Вимірювання здійснюються в віддалених місцях, як у зазначених, щоб вони не зазнавали впливу місцевих процесів, натомість репрезентуючи фонову (загальну) атмосферу. Невеличкий графік відображає сезонні зміни у виділенні та поглинанні вуглекислого газу рослинами. *Джерело: Scripps CO₂ Program*



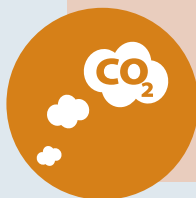
почала значно зростати в 19 столітті [Додаток В3], після того, як протягом попередніх 10 000 років залишалася в діапазоні від 260 до 280 (млн-1). Дані з кернів льоду за 800 000 років показують, що протягом цього часу концентрація CO₂ залишалася в діапазоні від 170 до 300 мільйонних частинок протягом багатьох циклів «льодовикового періоду» – див. Інфо-додаток, стор. В4, щоб дізнатися про льодовикові періоди – і жодного показника вище 300 мільйонних частинок до останніх 200 років не спостерігалось.



Додаток В3. Дані про зміни концентрації CO₂ протягом останніх 1000 років, отримані з аналізу повітря, зібраного з крижаного керну, видобутого з Антарктики (червоні квадрати), показують різкий зріст атмосферного CO₂, що розпочався наприкінці 19 століття. Сучасні атмосферні вимірювання з Мауна-Лоа нанесені на графік сірим кольором. Джерело: figure by Eric Wolff, data from Etheridge et al., 1996; MacFarling Meure et al., 2006; Scripps CO₂ Program.

Дізнайтеся про джерела викинутих людиною парникових газів:

- **Діоксид вуглецю (CO₂)** має як природні, так і антропогенні джерела, але рівень CO₂ збільшується зазвичай через згорання кам'яного вугілля, нафти і газу, виробництво цементу, знищення лісів (що зменшує поглинання CO₂ деревами та збільшує виділення CO₂ при розкладі опалого листя) та інші зміни у використанні землі. Збільшення рівня CO₂ є найбільшим чинником глобального потепління.
- **Метан (CH₄)** має як антропогенні, так і природні джерела викидів, і його рівень значно зріс з доіндустріальних часів; утримання худоби, вирощування рису у полях, наповнення смітників та використання природного газу (який в основному складається з CH₄, частина якого може виділятися під час його видобутку, транспортування та використання) - все це спричинило збільшення концентрації метану.
- Концентрація **Оксиду Азоту (N₂O)** зросла, в основному, через сільськогосподарські діяльності, такі як використання азотних добрив і зміна землекористування.
- **Галогеновмісні сполуки**, включаючи хлорофторвуглеводні (ХФВ), є хімічними речовинами, що використовуються як холодоагенти і вогнестійкі матеріали. Крім того, що вони є потужними парниковими газами, ХФВ також пошкоджують озоновий шар. Виробництво більшості ХФВ зараз заборонено, тому їх вплив починає зменшуватися. Однак, багато заміників ХФВ також є потужними парниковими газами, і їх концентрації, а також концентрації інших галогеновмісних сполук, продовжують зростати.



Вимірювання форм (ізотопів) вуглецю в сучасній атмосфері показують чіткий відбиток додавання «старого» вуглецю (збідненого природним радіоактивним ^{14}C), що надходить від згоряння викопного палива (на відміну від «новішого» вуглецю, що надходить від живих організмів). Більше того, відомо, що людська діяльність (за винятком змін у землекористуванні) наразі викидає приблизно 10 мільярдів тонн вуглецю щороку, в основному за рахунок спалювання викопного палива, чого більш ніж достатньо, щоб пояснити помічене збільшення концентрації.

Описані вище та інші докази переконують нас в тому, що підвищена концентрація CO_2 в нашій атмосфері є результатом діяльності людини.

Кліматичні дані показують схильність до потепління

Оцінка збільшення середньої глобальної поверхневої температури вимагає ретельного аналізу мільйонів вимірів даних зібраних з усього світу, зокрема із лісових станцій, суден і супутників.

Незважаючи на певні труднощі, пов'язані з синтезом таких даних, кілька незалежних команд прийшли до висновку, що середня глобальна поверхнева температура зросла приблизно на 1°C ($1,8^\circ\text{F}$) з 1900 року [Додаток B4]. Не дивлячись на дещо різну поведінку у зростанні тенденції, кожні з останніх чотирьох десятиліть були теплішими за будь-яку інше, згідно з інструментальними записами, що ведуться з 1850 року.

Повертаючись в далеке минуле ще до того, як точні термометри були широко доступні, температури можна реконструювати за допомогою чутливих до клімату індикаторів «прокси»,



Дізнайтеся більше про льодовикові періоди:

Детальний аналіз океанських осадів, крижаних кернів та інших даних показує, що протягом щонайменше останніх 2,6 мільйонів років Земля пережила тривалі періоди, коли температури були набагато нижчими, ніж сьогодні, і великі площі північної півкулі були покриті товстими шарами льоду. Ці холодні льодовикові періоди, що тривали в останніх циклах близько 100 000 років, переривалися коротшими теплими "міжледниковими" періодами, включаючи останніх 10 000 років.

Шляхом поєднання теорії, спостережень і моделювання вчені зрозуміли, що льодовикові періоди* виникають завдяки повторюваним змінам в орбіті Землі, які переважно змінюють регіональний і сезонний розподіл сонячної енергії, що до неї доходить. Ці відносно невеликі зміни в сонячній енергії підсилюються протягом тисяч років за рахунок поступових змін покриву льоду на Землі (криосфери), особливо на північній півкулі, і складу атмосфери, що врешті-решт призводить до значних

змін глобальної температури.

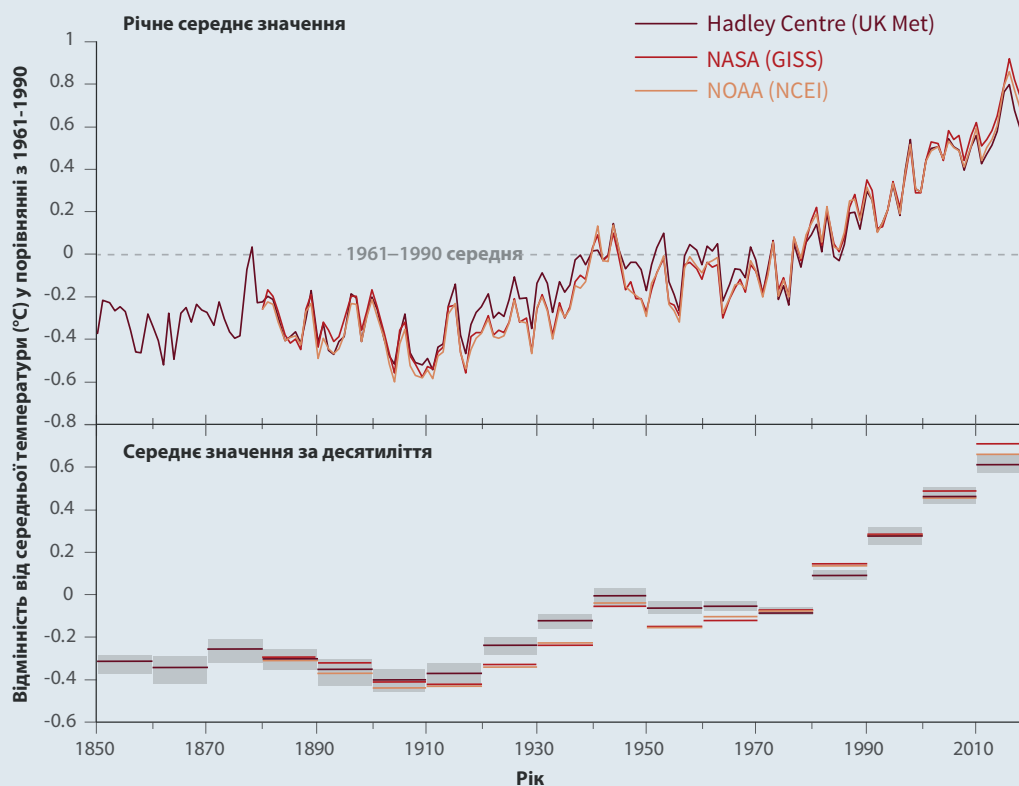
Середні зміни глобальної температури під час циклу льодових періодів оцінюються приблизно як $5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ($9^\circ\text{F} \pm 2^\circ\text{F}$).

***Зверніть увагу, що з геологічної точки зору**

Земля перебуває в льодовиковому періоді, починаючи з часу утворення Антарктичного крижаного покриву, яке відбулося приблизно 36 мільйонів років тому. Однак, в цьому документі ми використовуємо термін у його більш розмовному значенні, що вказує на регулярне поширення великих льодових покривів над Північною Америкою і північною Євразією.

у таких матеріалах, як кільця дерев, керни льоду та морський осад. Порівняння записів з термометрів із такими проксі-вимірами свідчить про те, що період часу з початку 1980-х років був найтеплішим 40-річним періодом за щонайменше вісім століть, і глобальна температура збільшується до максимальних значень, востаннє зафіксованих 5 000-10 000 років тому під час найтеплішої частини нашого поточного міжледникового періоду.

Багато інших негативних наслідків, пов'язаних із потеплінням, стали очевидними в останні роки. Покров арктичного літнього морського льоду стрімко скоротився. Зросла теплоємність океану. Глобальний середній рівень моря підвищився приблизно на 16 см (6 дюймів) з 1901 року як через розширення теплішої океанської води, так і через додавання талої води з льодовиків і крижаних покривів на суші. Потепління та зміни кількості опадів змінюють географічні ареали багатьох видів рослин і тварин, час їхнього життєвого циклу. Окрім впливу на клімат, частина надлишку CO₂ в атмосфері поглинається океаном, змінюючи його хімічний склад (спричиняючи підкислення океану).



Додаток В4. Середня глобальна поверхнева температура Землі зросла, як показано на цьому графіку, що включає поєднані вимірювання на землі та в океані з 1850 по 2019 рік, отримані з трьох незалежних аналізів наявних наборів даних. Верхня панель показує щорічні середні значення з трьох аналізів, а нижня панель показує десятирічні середні значення, включаючи невизначений діапазон (сірі смуги) для бордового датасету (HadCRUT4). Зміни температури є відносними до значення середньої глобальної поверхневої з 1961 по 1990 рік. *Джерело:*

NOAA Climate.gov, based on IPCC AR5. Data from UK Met Office Hadley Centre (бордовий), US National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies (червоний), and US National Oceanic and Atmospheric Administration National Centers for Environmental Information (помаранчевий).



Багато складних процесів формують наш клімат.

Керуючись лише фізикою ми побачимо, що кількість енергії, яку CO₂ поглинає і випромінює, подвоєння концентрації CO₂ в атмосфері з доіндустріального рівня (приблизно до 560 (млн-1)), самі по собі спричиняють збільшення глобальної середньої температури приблизно на 1 °C (1,8 °F). Проте, в загальній системі клімату речі зазвичай більш складніші; потепління спричиняє додаткові ефекти (зворотний зв'язок), які або посилюють, або послаблюють початкове потепління.

Найважливішими зворотними зв'язками є різні форми води. Тепліша атмосфера зазвичай містить більше водяної пари.

Водяна пара є потужним парниковим газом, який призводить до більшого потепління; її короткий час перебування в атмосфері зумовлює її збільшення в основному в ногу з потеплінням. Таким чином, водяна пара розглядається як підсилювач, а не рушій зміни клімату. Вищі температури в полярних регіонах розплавляють морський лід і зменшують сніжний покрив, викриваючи темні води океану та суходол, які можуть поглинати більше тепла, що, вочевидь, призводить до подальшого потепління. Ще один важливий, але мінливий зворотний зв'язок стосується змін у хмарах. Потепління та збільшення водяної пари можуть призвести до збільшення або зменшення хмарності, що може як підсилити, так і послабити зміни температури, залежно від розмірів, висоти та властивостей хмар. Найновіша оцінка наукових досліджень вказує на те, що загальний глобальний ефект змін у хмарах, ймовірно, полягає в підсиленні потепління.

Океан пом'якшує зміни клімату. Океан - це величезний резервуар тепла, але важко прогріти його на всю глибину, тому що тепла вода залишається біля поверхні. Швидкість, з якою тепло передається глибинам океану, тому й повільна; вона змінюється від року до року та від десятиліття до десятиліття, і це допомагає визначити швидкість потепління на поверхні. Спостереження за підповерхневим океаном були значно обмежені приблизно до 1970 року, але з тих пір потепління на верхніх 700 м (2300 футів) стало очевидним, а потепління на більшій глибині також чітко спостерігається приблизно з 1990 року.

Температури на поверхні та кількість опадів в більшості регіонів значно відрізняються від глобального середнього значення через географічне розташування, зокрема широту та континентальне положення. Як середні значення температури, опадів, так і їх екстремальні значення (які загалом мають найбільший вплив на природні системи та інфраструктуру людини), відчувають на собі вплив сильних вітрів.

Оцінка впливу процесів зворотного зв'язку, темпу потепління та зміни регіонального клімату вимагає використання математичних моделей атмосфери, океану, суші та льоду (кріосфери), заснованих на встановлених законах фізики та останніх знаннях про фізичні, хімічні та біологічні процеси, що впливають на клімат, і запускаються на потужних комп'ютерах. Моделі різняться у своїх прогнозах щодо темпів (або рівня) очікуваного потепління (в залежності від типу моделі та припущень, що використовуються при моделюванні деяких кліматичних процесів, зокрема утворення хмар та перемішування океану), але всі такі моделі погоджуються з тим, що загальний глобальний ефект зворотних зв'язків полягає в підсиленні потепління.

Людська діяльність змінює клімат.

Суворий аналіз усіх даних та джерел показує, що значна кількість спостереженого глобального потепління протягом останніх 50 років не може бути пояснена природними причинами і, замість цього, викриває значну роль впливу людської діяльності.

Для виявлення впливу людини на клімат вчені повинні враховувати купу природних чинників, які впливають на температуру, опади та інші аспекти клімату від локального до глобального значення, інтервалом від декількох днів до десятиліть і більше. Однією з таких природних варіацій є Ель-Ніньйо (ENSO), нерегулярне чергування потепління та похолодання (тривалістю близько двох до семи років) в екваторіальному Тихому океані, що роками спричиняє значні регіональні та глобальні перемини температури та розподілу опадів. Вулканічні виверження теж видозмінюють клімат, зокрема, збільшують кількість дрібних (аерозольних) частинок в стратосфері, які відбивають або поглинають сонячне світло, що призводить до недовготривалого охолодження поверхні, яке зазвичай триває близько двох-трьох років. Повільних повторюваних коливань орбіти Землі навколо Сонця протягом сотень тисяч років, які змінюють розподіл сонячної енергії, що її отримує Земля, було достатньо, аби запустити цикли льодовикового періоду за останні 800 000 років.

“Відбиток” є потужним інструментом для вивчення причин змін клімату. Різні впливи на клімат призводять до різних моделей, помітних у кліматичних записах. Це стає очевидним, коли вчені досліджують не тільки зміни середньої температури планети, але також більш детально досліджують географічні та часові моделі змін клімату. Наприклад, збільшення енергетичного випромінювання Сонця призведе до зовсім іншої моделі змін температури (на поверхні Землі та по вертикалі в атмосфері) порівняно з тою, що спричиниться збільшенням концентрації CO₂. Спостережені зміни атмосферної температури вказують на “відбиток”, який відповідає

продовження



Дізнайтеся більше про інші причини зміни клімату, спровоковані людиною

In addition to emitting greenhouse gases, human activities have also altered Earth's energy balance through, for example:

- **Зміни у землекористанні** Зміни в способі використання землі, наприклад, для лісів, сільськогосподарських полів або міст

можуть спричиняти як підвищення, так і зниження температури

на місцевому рівні, змінюючи відбивання від Земних поверхонь (вплив на те, скільки сонячного світла відбивається назад у космос) і змінюючи вологість регіону.

- **Викиди забруднюючих речовин (крім парникових газів).** Внаслідок деяких промислових та сільськогосподарських процесів, відбувається викид забруднюючих речовин, які утворюють аерозолі (дрібні краплини або частки, що перебувають у повітрі).

Більшість аерозолів охолоджують Землю, відбиваючи сонячне світло назад у космос. Деякі аерозолі також впливають на утворення хмар, що може мати охолоджувальний або нагріваючий ефект, залежно від їхнього типу та розташування. Частки чорного вуглецю (або "сажа"), які утворюються при згоранні кам'яного вугілля, нафти або рослинності, в основному мають нагріваючий ефект, оскільки поглинають сонячне випромінювання.

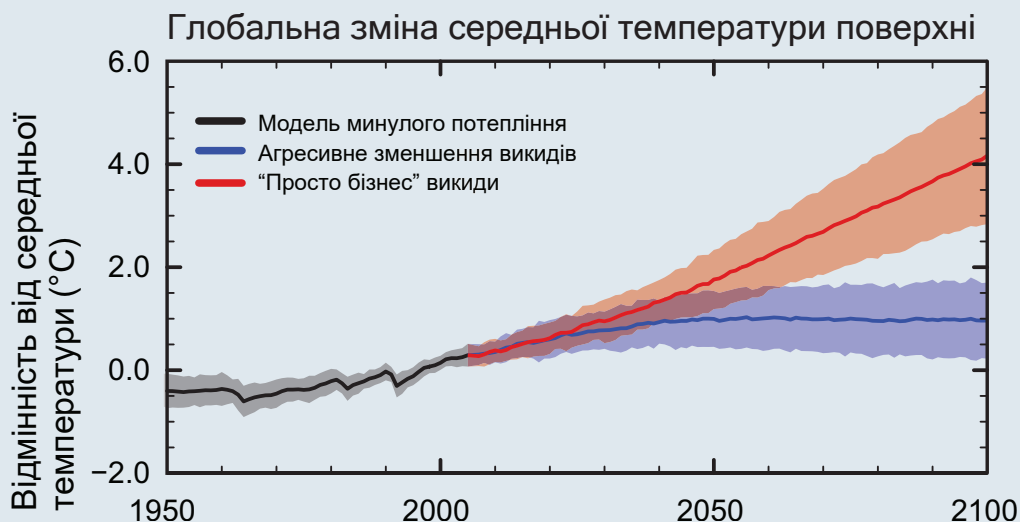


збільшенню концентрації CO₂ в довгостроковому плані, що буде викликане лише коливаннями на Сонці. Вчені регулярно перевіряють, чи можуть суто природні зміни на Сонці, вулканічна активність або внутрішня мінливість клімату правдоподібно пояснити моделі змін, які вони спостерігали в різноманітних аспектах кліматичної системи. Дані аналізи показали, що кліматичні зміни, які спостерігаються останніми десятиліттями, не можуть бути пояснені лише природними факторами..

Як клімат зміниться в майбутньому?

Вчені зробили величезні успіхи в спостереженнях, побудові теорії та моделюванні кліматичної системи Землі; ці досягнення дозволяють їм з кожним разом з більшою впевненістю передбачати майбутні зміни клімату. Втім, існує кілька ключових проблем, що роблять неможливим точне прогнозування глобальних або регіональних змін температури на десятиліття. По-перше, ми не можемо передбачити, скільки вуглекислого газу будуть викидати люди, оскільки це залежить від таких факторів, як розвиток глобальної економіки та зміна споживання й виробництва енергії в суспільстві протягом наступних десятиліть. По-друге, з нашим поточним розумінням складностей того, як працюють кліматичні зворотні зв'язки, існує ряд можливих результатів навіть для конкретного сценарію викидів CO₂. Нарешті, протягом десятиліть або близько того природна мінливість може модулювати вплив основної тенденції температури. Враховуючи всі прогнози моделей, Земля продовжуватиме значно нагріватись протягом наступних декількох десятиліть або навіть століть. Якщо не буде технологічних або політичних змін для зменшення темпів викидів з їхньої теперішньої траєкторії, то до кінця XXI століття очікується додаткове глобальне потепління від 2,6 до 4,8 °C (від 4,7 до 8,6 ° F) на додачу до сучасних показників. [Додаток B5]. Прогнозувати, що ці діапазони означатимуть для клімату в будь-якій конкретній місцевості, є складною науковою проблемою, але оцінки продовжують удосконалюватися в міру розвитку регіональних і місцевих моделей.

Додаток B5. Кількість та темп нагрівання, очікувані на XXI століття, залежать від загальної кількості парникових газів, які людство викидає. Моделі прогнозують збільшення температури для сценарію викидів в стилі "просто бізнес" (червоний графік), і агресивне скорочення викидів, яке впаде близько до нуля через 50 років (синім). Чорний - це змодельована оцінка минулого потепління. Кожна суцільна лінія являє собою середнє значення різних циклів моделі з використанням того самого сценарію викидів, а заштриховані області забезпечують міру розкиду (одне стандартне відхилення) між змінами температури, прогнозованими різними моделями. Усі дані відносяться до базового періоду (встановлено нульовим) 1986-2005. Джерело: Based on IPCC AR5



11

Якщо світ нагрівається, чому зима та літо все ще часто дуже холодні?

Глобальне потепління є довгостроковою тенденцією, але це не означає, що кожен рік буде теплішим за попередній. Повсякденні та щорічні зміни погодних умов продовжуватимуть створювати незвичайно холодні дні та ночі, зими та літа, навіть якщо клімат потеплішає.

Зміна клімату означає не лише зміну глобальної середньої температури поверхні, а й зміни атмосферної циркуляції, розміру та характеру природних змін клімату та місцевої погоди. Події Ла-Нінья змінюють погодні умови так, що деякі регіони стають більш вологими, а вологе літо загалом прохолодніше. Сильніші вітри з полярних регіонів можуть іноді сприяти більш холодній зимі. Так само збереження однієї фази атмосферної циркуляції, відомої як Північноатлантична осциляція, сприяло появі кількох останніх холодних зим у Європі, східній частині Північної Америки та північній Азії.

Моделі циркуляції атмосфери та океану змінюватимуться разом із нагріванням Землі та впливатимуть на сліди шторму та інші аспекти погоди. Глобальне потепління сприяє збільшенню кількості теплих днів і сезонів та зменшенню кількості холодних. Наприклад, в континентальних Сполучених Штатах у 1960-х роках було більше денних рекордних найнижчих температур, ніж рекордних найвищих, але в 2000-х роках ситуація змінилася й тепер рекордів з найвищими температурами вдвічі більше рекордів з найнижчими. Іншим важливим прикладом є те, що за останні десятиліття спека почастишала у великих частинах Європи, Азії, Південної Америки та Австралії. Хвилі морської спеки також посилюються.



12

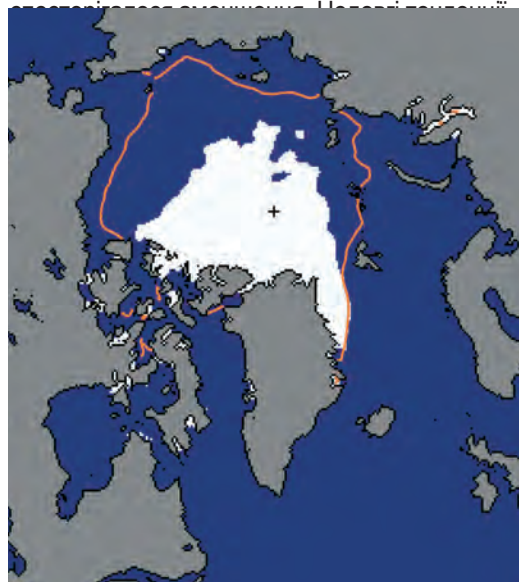
Чому арктичний морський лід тоне, в той самий час як антарктичний ледь зазнав змін?

На площу морського льоду впливають вітри та океанські течії, а також температура. Морський лід у частково замкнутому Північному Льодовитому океані, здається, безпосередньо реагує на потепління, тоді як зміни у вітрах і в океані, здається, домінують у моделях змін клімату та площі морського льоду в океані навколо Антарктиди.

Деякі різниці у сезонній площі морського льоду між Арктикою та Антарктикою пов'язані з базовою географією та її впливом на атмосферну та океанічну циркуляцію. Арктика - це океанічний басейн, оточений здебільшого гірськими континентальними земельними масами, водночас Антарктида - континент, оточений океаном. В Арктиці площа морського льоду обмежена навколишніми земельними масами. Взимку в Південному океані морський лід може вільно розширюватися околицями океану, а його південні межі встановлюються узбережжям Антарктиди. Через те, що антарктичний морський лід формується на широтах, більш віддалених від Південного полюса (і ближче до екватора), менше льоду переживає літо. Площа морського льоду в обох полярних регіонах змінюється сезонно; проте довготривала переміна літньої і зимової площі льоду відрізняється у кожній півкулі, через зазначені базові географічні відмінності.

Морський лід в Арктиці суттєво зменшився з кінця 1970-х років, особливо влітку і восени. З початку супутникового спостереження в 1978 році, річний мінімальний обсяг морського льоду в Арктиці (який настає у вересні) зменшився приблизно на 40% [Додаток 5]. Морський лід знову розширюється кожної зими в Арктиці, але лід тонший, ніж раніше. Оцінки мінулого обсягу морського льоду свідчать, що цей спад може бути безпрецедентним протягом щонайменше останніх 1450 років. Оскільки морський лід має високу рефлексивність, потепління посилюється пропорційно зменшенню криги; більше сонячної енергії поглинається темною поверхнею океану.

Морський лід в Антарктиці демонстративно, але незначно збільшився загальною площею з 1979 по 2014 рік, хоча в деяких районах, наприклад на заході Антарктичного півострова,



спостерігалось зменшення. Недавні тенденції в Південному океані, в тому числі й ті, що спостерігаються, можуть легко виникнути через природну мінливість атмосфери, океану та системи морського льоду. Зміни в моделях приземних вітрів навколо континенту сприяли змінам в антарктичній моделі морського льоду; океанські фактори, такі як додавання прохолодної прісної води від танення шельфових крижин, також могли зіграти свою роль. Однак після 2014 року площа антарктичного льоду почала зменшуватися, досягнувши рекордно низького рівня (за 40 років супутникових даних) у 2017 році та залишаючись низькою протягом наступних двох років.

Додаток 5. Площа морського льоду в Арктиці влітку 2012 року (виміряна у вересні) була рекордно низькою, (показана білим кольором) порівняно з середньою площею літньої морської криги за період 1979-2000 років (показано оранжевим контуром). У 2013 році площа морської криги в Арктиці влітку дещо відновилася, але все ж була шостою найменшою площею за всю історію спостережень. У 2019 році площа морського льоду практично зрівнялася з другим найнижчим мінімумом в історії спостережень супутниками, разом з 2007 і 2016 роками - відстаючи тільки від 2012 року, який до всього ще й є рекордним мінімумом. 13 найнижчих значень морського льоду в ері спостережень супутниками спостерігалися за останні 13 років. *Джерело: National Snow and Ice Data Center*

13

Як зміна клімату впливає на силу та частоту повеней, посух, ураганів і торнадо?

Нижні шари атмосфери Землі стають теплішими та вологішими внаслідок антропогенних викидів парникових газів. Це дає можливість отримати більше енергії для штормів і деяких екстремальних погодних явищ. Згідно з теоретичними очікуваннями, типи подій, найбільш тісно пов'язані з температурою, такі як хвилі спеки та надзвичайно спекотні дні, стають більш імовірними. Сильні опади та снігопади (які збільшують ризик повеней) також загалом стають частішими.

Оскільки клімат Землі потеплішав, інтенсивні погодні явища почастишали по всьому світу. Вчені зазвичай називають ці погодні явища "екстремальними", якщо вони відрізняються від 90% або 95% подібних погодних явищ, які сталися раніше в цьому ж регіоні. Багато факторів впливають на будь-яке окреме екстремальне природне явище, включаючи закономірності природної мінливості клімату, такі як Ель-Ніньйо та Ла-Нінья, що ускладнює віднесення якоїсь конкретної екстремальної події до зміни клімату, спричиненої людиною. Проте дослідження можуть показати, чи потепління клімату зробило подію більш серйозною та ймовірнішою, чи ні.

Потепління клімату може сприяти інтенсивності теплових хвиль, збільшуючи ймовірність дуже спекотних днів і ночей. Потепління клімату також збільшує випаровування на суші, що може утворити посуху та зробити сприятливі умови для довгих лісових пожеж, ба навіть сезону пожеж. Потепління атмосфери також пов'язане з сильнішими опадами (дощами та сніговими бурями) через підвищення здатності повітря утримувати вологу. Явище Ель-Ніньйо сприяє посушливості в багатьох тропічних і субтропічних районах суходолу, тоді як явище Ла-Нінья сприяє підвищенню вологості в багатьох місцях. Очікується, що ці короткострокові та регіональні коливання стануть більш екстремальними в умовах потепління клімату.

Тепліша та вологіша атмосфера Землі та тепліші океани підвищують ймовірність того, що найсильніші буревії будуть ще сильнішими, під час них сильніше дощитиме, вони приходять на нові території, та будуть довшими й більшими. Це підтверджується наявними даними спостережень у Північній Атлантиці. Крім того, підвищення рівня моря (див. Запитання 14) збільшує кількість морської води, яка виштовхується до берега під час прибережних штормів, що разом із більшою кількістю опадів, спричинених бурями, може призвести до руйнівніших штормових хвиль і повеней. Хоча глобальне потепління, ймовірно, робить урагани більш інтенсивними, зміна кількості ураганів щороку є досить невизначеною. Це залишається предметом поточних досліджень.

Очікується, що деякі умови, сприятливі для сильних гроз, які породжують торнадо, стануть сприятливішими з потеплінням, але існує невизначеність щодо інших факторів, які впливають на формування торнадо, таких як зміни у вертикальних і горизонтальних коливаннях вітру.



14

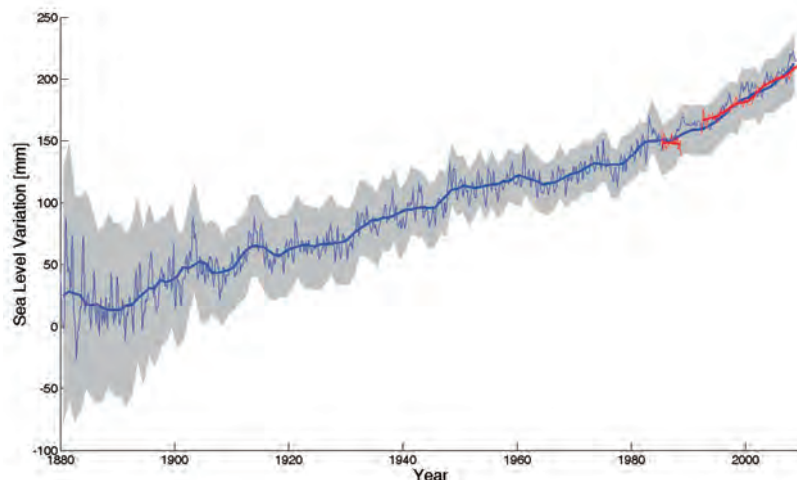
Наскільки швидко росте морський рівень води?

Довгострокові вимірювання мареографів і останні супутникові дані показують, що глобальний рівень моря підвищується, причому найкраща оцінка середнього глобального підвищення за останнє десятиліття становить 3,6 мм на рік (0,14 дюйма на рік). Швидкість підвищення рівня моря зросла після того, як у 1992 році було розпочато вимірювання з використанням альтиметрії з космосу; домінуючим чинником середнього глобального підвищення рівня моря з 1970 року є потепління, спричинене людиною. Загальне зростання, яке спостерігається з 1902 року, становить приблизно 16 см (6 дюймів) [Додаток 6].

Підняття рівня моря викликане розширенням об'єму води при потеплінні океану, таненням гірських льодовиків у всіх регіонах світу і втратами маси льодових покривів Гренландії і Антарктиди. Всі ці явища є результатом нагрівання клімату. Коливання рівня моря також відбуваються через зміни кількості води, що накопичується на суші. Ступінь зміни рівня моря в будь-якому конкретному місці також залежить від низки інших факторів, у тому числі від регіональних геологічних процесів та підняття суші, обтяженої попередніми льодовими покривами, підйом або опускання самої суші, і чи зміна вітрів і течій скупчує океанську воду на деяких узбережжях або навпаки відсуває її.

Наслідки підвищення рівня моря найбільш гостро відчуються у збільшенні частоти та інтенсивності випадкових штормових хвиль. Якщо викиди CO₂ та інших парникових газів продовжуватимуть збільшуватися їхніми нинішніми темпами, прогнозується, що рівень моря може підвищитися, як мінімум, ще на 0,4-0,8 м (1,3-2,6 футів) до 2100 року, хоча подальше танення льодового покриву зробить ці цифри значно вищими. Крім того, підвищення рівня моря не припиниться в 2100 році; рівень моря буде набагато вищим у наступні століття, оскільки море продовжує набирати тепло, а льодовики продовжують відступати. Залишається важкопередбачуваною деталлю реакція крижаних щитів Гренландії та Антарктиди на подальше потепління, але вважається, що Гренландія та, можливо, Західна Антарктида продовжуватимуть втрачати масу, тоді як більш холодні частини Антарктиди зможуть масу набирати, оскільки цими частинами пройде більше снігопадів з більш теплого повітря, що містить більше вологи. Рівень моря в останній міжльодовиковий (теплий) період приблизно 125 000 років тому досяг піку на 5-10 м вище сучасного рівня. У цей період у полярних регіонах було тепліше, ніж зараз. Це свідчить про те, що протягом тисячоліть тривалі періоди підвищеного тепла призведуть до дуже значних втрат частин Гренландського та Антарктичного льодовикових щитів і, як наслідок, підвищення рівня моря.

Додаток 6. Спостереження показують, що глобальний середній рівень моря піднявся приблизно на 16 см (6 дюймів) з кінця XIX століття. За останні десятиріччя рівень моря піднімається швидше; виміри з мареографами (синій) і супутниками (червоний) показують, що найкраща оцінка середнього зростання рівня моря за останні десять років становить приблизно 3,6 мм на рік (0,14 дюйма на рік). Затінені області представляють невизначеність рівня моря, яка зменшується зі збільшенням кількості місць вимірювань, використаних для розрахунку глобальних середніх значень, і зі збільшенням кількості даних.
Джерела: Shum and Kuo (2011)



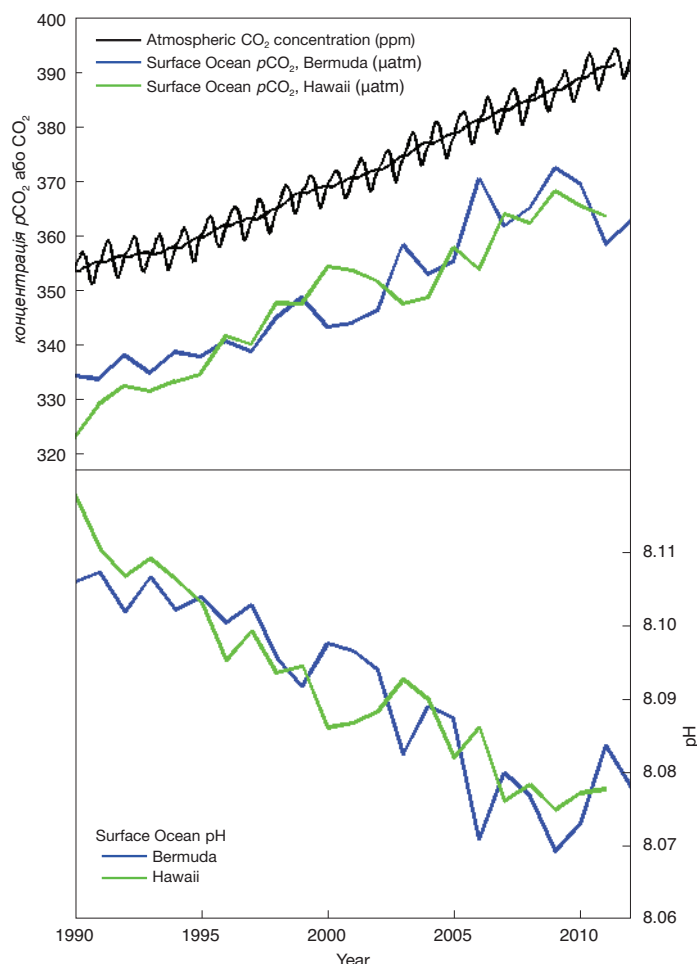
15

Що таке кислотність океану і чому це важливо?

Прямі спостереження хімічного складу океану показують, що хімічний баланс морських вод змінився в бік більш кислотного стану (нижчий рівень рН) [Додаток 7]. Деякі морські організми (такі як корали і деякі молюски) мають раковини, складені з кальцій карбонату, який легше розчиняється в кислотному середовищі. При збільшенні кислотності морської води цим організмам стає складніше формувати або підтримувати свої раковини.

CO₂ розчиняється у воді, утворюючи слабку кислоту. Океани поглинули близько третини CO₂, що викидається в атмосферу в результаті діяльності людини, що призводить до стійкого зниження рівня рН в океані. Зі збільшенням атмосферного вмісту CO₂ цей хімічний баланс зміниться ще сильніше протягом наступного століття. Лабораторні дослідження та інші експерименти показують, що за високого вмісту CO₂ та в більш кислих водах деякі види морських організмів мають спотворені раковини та менші темпи зростання, хоча ефект відрізняється залежно від виду. Підкислення також змінює колообіг поживних речовин й інших елементів чи то сполук в океані, і, ймовірно, змінить конкурентну перевагу між видами; вплив на морські екосистеми та харчові ланцюги ще не визначено.

Додаток 7. У міру збільшення CO₂ у повітрі спостерігалось збільшення вмісту CO₂ на поверхні океану (верхні шари) та зниження рН морської води (нижні шари). Джерело: *adapted from Dore et al. (2009) and Bates et al. (2012).*



16

Якою є впевненість вчених щодо нагрівання Землі протягом наступного століття?

Вони впевнені. Якщо викиди продовжать зростати в поточному темпі без технологічних або регуляторних обмежень, то очікується збільшення температури на 2,6 - 4,8 °C (4,7 - 8,6 °F), на додачу до змін, що уже настали в 21 столітті.

Додаток 8. Якщо викиди триватимуть з тими ж темпами, без технологічних чи регуляторних заходів, то найкраща оцінка полягає в тому, що глобальна середня температура підвищиться ще на 2,6-4,8 °C (від 4,7 до 8,6 °F) до кінця століття (праворуч). Прогнозується, що площі суші нагріються більше, ніж площі океану, а отже, більше, ніж середнє глобальне значення. На малюнку ліворуч показано прогнозоване потепління з дуже агресивним скороченням викидів. Цифри представляють мультимодельні оцінки середніх температур для 2081-2100 порівняно з 1986-2005 роками. *Джерело: IPCC AR5*

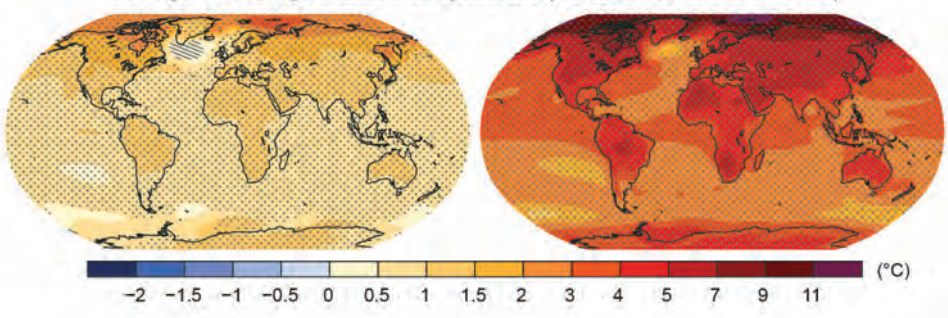
Підвищення температури через додавання великих кількостей парникових газів до атмосфери можна пояснити за допомогою дуже базових властивостей парникових газів. Це, в свою чергу, призведе до багатьох змін в природних кліматичних процесах, із загальним ефектом посилення глобального потепління. Ступінь потепління, яка буде відчутна, в значній мірі залежить від кількості парникових газів, які накопичуються в атмосфері, і, отже, від траєкторії викидів. Якщо загальні накопичені викиди від 1875 року не будуть перевищувати приблизно 900 гігатонн (900 мільярдів тонн) вуглецю, то наші шанси на зростання глобальної середньої температури з часів промислової ери нижче 2 °C (3,6 °F), відносяться як 2 до 3. Однак, дві третини цієї кількості вже було викинуто. Задачею є збереження зростання глобальної середньої температури нижче 1,5 °C (2,7 °F) дозволить викидати ще менше ніж з 1875 року.

Як завжди керуючися сталими законами фізики, кількість тепла, яку CO₂ поглинає та виділяє, подвоєння концентрації CO₂ в атмосфері порівняно з доіндустріальним рівнем (приблизно до 560 мільйонних частинок) самі по собі, без посилення будь-якими іншими ефектами, спричинять глобальне підвищення середньої температури на приблизно 1 °C (1,8 °F). Однак загальна кількість нагрівання від даної кількості викидів залежить від ланцюжків ефектів (зворотних зв'язків), які можуть індивідуально підсилювати або зменшувати початкове нагрівання..

Найважливіший посилюючий зворотний зв'язок викликається водяною парою, яка є потужним парниковим газом. Зі збільшенням концентрації CO₂ і нагріванням атмосфери, тепліше повітря може утримувати більше вологості і утримувати більше тепла в тропоосфері (нижній атмосфері). Також, при таненні арктичного морського льоду і льодовиків, більше сонячного світла поглинається темними поверхнями нижніх земель та океанів, що призводить до подальшого зігрівання та подальшого танення льоду і снігу. Найбільшою невизначеністю в нашому розумінні зворотних зв'язків є властивості хмар (які можуть мати рівною мірою позитивні та негативні зв'язки) та те, як зміняться хмари відповідно до видозміни клімату.

Інші важливі зворотні зв'язки пов'язані з вуглецевим циклом. Зараз земля та океани разом поглинають близько половини людських викидів CO₂, але очікується, що невдовзі потужності землі та океану в питаннях зберігання додаткового вуглецю зменшаться, що призведе до швидшого збільшення атмосферного CO₂ та прискореного нагрівання. Моделі різняться у своїх прогнозах щодо очікуваного збільшення нагрівання, але всі вони погоджуються, що загальний чистий ефект зворотних зв'язків полягає в посиленні нагрівання.

Change in average surface temperature (1986–2005 to 2081–2100)



17

Чи є приводом для занепокоєння зміна клімату на кілька градусів?

Так. Незважаючи на те, що підвищення середньої глобальної температури на кілька градусів не схоже на значне, глобальна середня температура під час останнього льодовикового періоду була лише приблизно на 4-5 °C (7-9 °F) нижчою, ніж зараз. Глобальне потепління лише на кілька градусів вже призведе до принципових широких змін регіональної та місцевої температури та опадів, а також до збільшення деяких видів екстремальних погодних явищ. Ці та інші зміни (такі як підвищення рівня моря та штормові хвилі) матимуть серйозний вплив на людські суспільства та світ природи.

Як теорія, так і прямі спостереження підтвердили, що глобальне потепління пов'язане з більшим нагріванням суші, ніж океанів, зволоженням атмосфери, зміною регіональних моделей опадів, збільшенням частоти екстремальних погодних явищ, підкисленням океану, таненням льодовиків і підвищенням рівня моря (що збільшує ризик затоплення узбережжя та штормового нагону). Уже зараз рекордно високі температури в середньому значно перевищують рекордно низькі температури, вологі райони стають вологішими, оскільки сухі райони стають сухішими, сильні зливи стають сильнішими, а сніговий покрив (важливе джерело прісної води для багатьох регіонів) зменшується.

Очікується, що ці наслідки лише посиляться з більшим потеплінням і загрожуватимуть виробництву продуктів харчування, запасам прісної води, прибережній інфраструктурі та особливо добробуту численого населення, яке проживає в низинних районах. Не беручи до уваги те, що деякі регіони можуть отримати певну місцеву вигоду від потепління, довгострокові наслідки загалом будуть руйнівними.

Причиною для переживання є не лише підвищення середньої глобальної температури на кілька градусів – важливий також темп, з яким відбувається це потепління (див. Запитання 6). Швидкі кліматичні зміни, викликані діяльністю людини, означають, що залишається менше часу для введення адаптаційних заходів для суспільства й екосистем, що створює більші ризики в районах, вразливих до більш інтенсивних екстремальних погодних явищ і підвищення рівня моря.

18

Що роблять вчені для усунення ключових невизначеностей в нашому розумінні кліматичної системи?

Наука - це безперервний процес спостереження, розуміння, моделювання, перевірки і прогнозування. Прогнозування довгострокової тенденції глобального потепління внаслідок зростання концентрації парникових газів є стійким і було підтверджено зростаючим обсягом доказів. Тим не менш, розуміння певних аспектів зміни клімату залишається неповним. Прикладами є природні перемини на десятилітньо-столітніх масштабах та на регіонально-місцевому рівні, реакції хмар на зміни клімату, що є предметом активних досліджень.

продовження

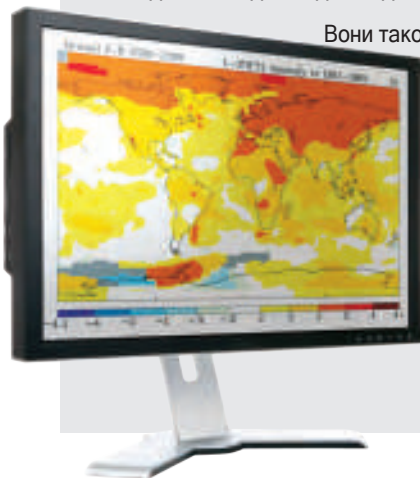
Чому комп'ютерні моделі використовують для вивчення зміни клімату?

Майбутня еволюція клімату Землі, яка піддається впливу нинішніх стрімких темпів зростання атмосферного CO₂, не має точних аналогів у минулому, і її неможливо правильно зрозуміти за допомогою лабораторних експериментів. Оскільки ми також не можемо проводити навмисні контрольовані експерименти на самій Землі, комп'ютерні моделі є одними з найважливіших інструментів, які використовуються для вивчення кліматичної системи Землі.

Кліматичні моделі базуються на математичних рівняннях, які представляють найкраще розуміння основних законів фізики, хімії та біології, що керують поведінкою атмосфери, океану, поверхні суходолу, криги та інших частин кліматичної системи, а також взаємодії між ними. Найповніші кліматичні моделі, моделі усїєї Земної системи, розроблені з такою кількістю деталей, яку ми лише можемо уявити та доступні суперкомп'ютери.

Починаючи з 1960-х років можливості кліматичних моделей постійно вдосконалювалися. Використовуючи рівняння на основі фізики, моделі можна перевірити та успішно оперувати широким діапазоном погодних і кліматичних варіацій, наприклад, від окремих штормів, меандрів струменевого потоку, явищ Ель-Ніньо та клімату минулого століття. Їхні прогнози щодо найвидатніших особливостей довгострокового сигналу зміни клімату, викликаного діяльністю людини, залишаються надійними, оскільки покоління дедалі складніших моделей дають деталі, багатші на зміни.

Вони також використовуються для проведення експериментів, щоб виділити конкретні причини зміни клімату та дослідити наслідки різних сценаріїв майбутніх викидів парникових газів та інших впливів на клімат.



Порівняння прогнозів моделі зі спостереженнями визначає те, що вже добре зрозуміло, і водночас виявляє невизначеності чи прогалини. Це допомагає визначити пріоритети для нових досліджень. Тому ретельний моніторинг усїєї кліматичної системи – атмосфери, океанів, суші та льоду – є критично важливим, оскільки кліматична система може бути сповнена сюрпризів.

Разом, польові й лабораторні дані та теоретичне розуміння використовуються для вдосконалення моделей кліматичної системи Землі і покращення відображення ключових процесів в них, особливо тих, що пов'язані з хмарами, аерозолями та транспортом тепла в океанах. Це критично важливо для точного моделювання зміни клімату та пов'язаних з нею змін у сильних погодних явищах, особливо на регіональних і місцевих масштабах, важливих для прийняття політичних рішень.

Моделювання того, як хмари вестимуть себе під час потепління і, у свою чергу, можуть вплинути на потепління, залишається однією з головних проблем для глобальних кліматичних моделей, частково через те, що різні типи хмар по-різному впливають на клімат, а багато хмарних процесів відбуваються в масштабах, менших, ніж більшість сучасних моделей здатні вирішити. Більша потужність комп'ютера вже дозволяє вирішити деякі з цих завдань у моделях нового покоління.

Десятки груп та наукових установ працюють над кліматичними моделями, і вчені тепер мають можливість аналізувати результати практично всіх основних моделей земної системи світу та порівнювати їх між собою, та із спостереженнями зокрема. Такі можливості приносять величезну користь у виявленні сильних і слабких сторін різних моделей і діагностиці причин відмінностей між моделями, щоб дослідження могло повністю зосередитися на ключових процесах. Відмінності між моделями дозволяють робити оцінку невизначеності серед прогнозів майбутніх змін клімату. Крім того, великі архіви результатів багатьох різних моделей допомагають вченим визначити аспекти прогнозів зміни клімату, які є надійними та які можна інтерпретувати з точки зору відомих фізичних механізмів.

Вивчення того, як клімат реагував на великі зміни в минулому, є ще одним способом перевірити, чи ми розуміємо, як працюють різні процеси, і чи здатні моделі надійно працювати в широкому діапазоні умов.

19

Чи є катастрофічні сценарії про точки неповернення, такі як "зупинка Гольфстріму" та вивільнення метану з Арктики, причиною для турботи?

Результати найкращих доступних кліматичних моделей не передбачають різкої зміни (або колапсу) атлантичної меридіональної циркуляції, яка включає Гольфстрім, у найближчому майбутньому. Однак це та інші потенційно небезпечні різкі зміни, такі як вивільнення метану та вуглекислого газу внаслідок танення вічної мерзлоти, активно залишаються предметами наукових досліджень. Деякі різкі зміни вже відбуваються, наприклад, зменшення площі арктичного морського льоду (див. Запитання 12), і в міру потепління не можна виключити можливість інших великих різких змін.

Склад атмосфери змінюється до умов, яких не було мільйони років, тому ми йдемо наче на мінному полі, де невизначеність доволі велика. Кліматична система включає багато конкуруючих процесів, які можуть перевести клімат в інший стан після перевищення порогового значення.

Один з відомих прикладів - це південно-північна циркуляція океану, яка підтримується шляхом опускання холодної солоної води в Північній частині Атлантичного океану і включає транспорт додаткового тепла до Північного Атлантичного океану за допомогою Потіку Гольфстріму. Під час останнього льодовикового періоду, потоки прісної води, що вийшли з льодовикового покриву після його танення на півночі Америки призвели до зниження цієї циркуляції. Це, в свою чергу, спричинило поширені зміни клімату на Північній півкулі. Процес опріснення Північного Атлантику від танення льодовика в Гренландії відбувається поступово і, отже, не призводить до раптових змін.

Інше занепокоєння стосується Арктики, де значне потепління може дестабілізувати метан (парниковий газ), що утримується в океанських недрах і вічній мерзлоті, потенційно призводячи до швидкого вивільнення значної кількості метану. Якби відбувся такий швидкий викид, це б спровокувало великі швидкі кліматичні зміни. Такі ризиковані перемини вважаються малоімовірними в цьому столітті, але за визначенням їх важко передбачити. Тому вчені продовжують вивчати можливість перевищення таких переломних точок, аби попередити незворотні зміни.

На додаток до різних змін у самій кліматичній системі, стійка зміна клімату може перетинати порогові значення, які викликають стрімкі зміни в інших системах. У людських системах, наприклад, інфраструктура, як правило, будується з урахуванням мінливості клімату під час будівництва. Поступові кліматичні зміни можуть спричинити знецінити її корисність, наприклад, коли підвищення рівня моря раптово перевищує морські стінки або коли танення вічної мерзлоти спричиняє раптове руйнування трубопроводів, будівель або ж доріг. У природних системах, коли температура повітря та води підвищується, деякі види, такі як Пискуха та багато океанських Коралів, більше не зможуть вижити у своїх нинішніх місцях існування та будуть змушені переселитися (якщо можливо) або швидко адаптуватися. Інші види можуть почуватися краще в нових умовах, викликаючи сильний ребаланс екосистем; наприклад, високі температури дозволили більшій кількості короїдів вижити взимку в деяких регіонах, де спалахи жуків знищили ліси.



20

Якби викиди газів парникового ефекту зупинилися, повернувся б клімат до свого стану, яким він був 200 років тому?

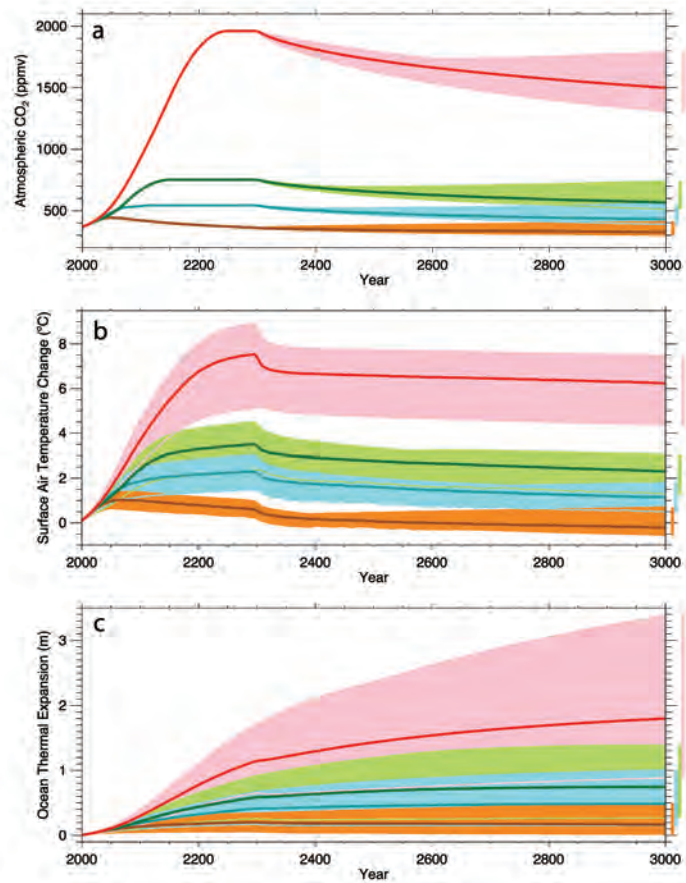
No. Even if emissions of greenhouse gases were to suddenly stop, Earth's surface temperature would require thousands of years to cool and return to the level in the pre-industrial era.

If emissions of CO₂ stopped altogether, it would take many thousands of years for atmospheric CO₂ to return to “pre-industrial” levels due to its very slow transfer to the deep ocean and ultimate burial in ocean sediments. Surface temperatures would stay elevated for at least a thousand years, implying a long-term commitment to a warmer planet due to past and current emissions. Sea level would likely continue to rise for many centuries even after temperature stopped increasing [FIGURE 9]. Significant cooling would be required to reverse melting of glaciers and the Greenland ice sheet, which formed during past cold climates. The current CO₂-induced warming of Earth is therefore essentially irreversible on human timescales. The amount and rate of further warming will depend almost entirely on how much more CO₂ humankind emits.

Scenarios of future climate change increasingly assume the use of technologies that can remove greenhouse gases from the atmosphere. In such “negative emissions” scenarios, it is assumed that at some point

in the future, widespread effort will be undertaken that utilises such technologies to remove CO₂ from the atmosphere and lower its atmospheric concentration, thereby starting to reverse CO₂-driven warming on longer timescales. Deployment of such technologies at scale would require large decreases in their costs. Even if such technological fixes were practical, substantial reductions in CO₂ emissions would still be essential.

FIGURE 9. If global emissions were to suddenly stop, it would take a long time for surface air temperatures and the ocean to begin to cool because the excess CO₂ in the atmosphere would remain there for a long time and would continue to exert a warming effect. Model projections show how atmospheric CO₂ concentration (a), surface air temperature (b), and ocean thermal expansion (c) would respond following a scenario of business-as-usual emissions ceasing in 2300 (red), a scenario of aggressive emission reductions, falling close to zero 50 years from now (orange), and two intermediate emissions scenarios (green and blue). The small downward tick in temperature at 2300 is caused by the elimination of emissions of short-lived greenhouse gases, including methane. Source: Zickfeld et al., 2013



This document explains that there are well-understood physical mechanisms by which changes in the amounts of greenhouse gases cause climate changes. It discusses the evidence that the concentrations of these gases in the atmosphere have increased and are still increasing rapidly, that climate change is occurring, and that most of the recent change is almost certainly due to emissions of greenhouse gases caused by human activities. Further climate change is inevitable; if emissions of greenhouse gases continue unabated, future changes will substantially exceed those that have occurred so far. There remains a range of estimates of the magnitude and regional expression of future change, but increases in the extremes of climate that can adversely affect natural ecosystems and human activities and infrastructure are expected.

Citizens and governments can choose among several options (or a mixture of those options) in response to this information: they can change their pattern of energy production and usage in order to limit emissions of greenhouse gases and hence the magnitude of climate changes; they can wait for changes to occur and accept the losses, damage, and suffering that arise; they can adapt to actual and expected changes as much as possible; or they can seek as yet unproven “geoengineering” solutions to counteract some of the climate changes that would otherwise occur. Each of these options has risks, attractions and costs, and what is actually done may be a mixture of these different options. Different nations and communities will vary in their vulnerability and their capacity to adapt. There is an important debate to be had about choices among these options, to decide what is best for each group or nation, and most importantly for the global population as a whole. The options have to be discussed at a global scale because in many cases those communities that are most vulnerable control few of the emissions, either past or future. Our description of the science of climate change, with both its facts and its uncertainties, is offered as a basis to inform that policy debate.

Автори

Наступні особи працювали в якості основної групи авторів для видання цього документа у 2014 та 2020 роках:

- Eric Wolff FRS, (UK lead), University of Cambridge
- Inez Fung (NAS, US lead), University of California, Berkeley
- Brian Hoskins FRS, Grantham Institute for Climate Change
- John F.B. Mitchell FRS, UK Met Office
- Tim Palmer FRS, University of Oxford
- Benjamin Santer (NAS), Lawrence Livermore National Laboratory
- John Shepherd FRS, University of Southampton
- Keith Shine FRS, University of Reading.
- Susan Solomon (NAS), Massachusetts Institute of Technology
- Kevin Trenberth, National Center for Atmospheric Research
- John Walsh, University of Alaska, Fairbanks
- Don Wuebbles, University of Illinois

Підтримку персоналу для огляду (критики) 2020 року надали Richard Walker, Amanda Purcell, Nancy Huddleston, and Michael Hudson. Ми висловлюємо особливу подяку Rebecca Lindsey та NOAA Climate.gov за надання даних і оновлення матеріалів.

Критики

Наступні особи виступали рецензентами документа 2014 року відповідно до процедур, затверджених Королівським Товариством та Національною Академією Наук:

- Richard Alley (NAS), Department of Geosciences, Pennsylvania State University
- Alec Broers FRS, Former President of the Royal Academy of Engineering
- Harry Elderfield FRS, Department of Earth Sciences, University of Cambridge
- Joanna Haigh FRS, Professor of Atmospheric Physics, Imperial College London
- Isaac Held (NAS), NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
- John Kutzbach (NAS), Center for Climatic Research, University of Wisconsin
- Jerry Meehl, Senior Scientist, National Center for Atmospheric Research
- John Pendry FRS, Imperial College London
- John Pyle FRS, Department of Chemistry, University of Cambridge
- Gavin Schmidt, NASA Goddard Space Flight Center
- Emily Shuckburgh, British Antarctic Survey
- Gabrielle Walker, Journalist
- Andrew Watson FRS, University of East Anglia

Підтримка

Підтримка для видання 2014 року надходила з Фондів НАН. Ми щиро дякуємо Фонду Ральфа Дж. і Керол М. Цицерон за підтримку виробництва цього видання 2020 року.