

Зміна клімату Докази та причини



Оновлення 2020

*Огляд від Королівського товариства
та Національної академії наук США*



THE
ROYAL
SOCIETY

Передмова

ЗМІНА КЛІМАТУ Є ОДНИМ ІЗ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ВИКЛИКІВ СУЧАСНОСТІ. Відразу ґрунтуючись на багатьох доказах, можна з упевненістю сказати, що людина змінює клімат Землі. Атмосфера та океани потеплішали, що супроводжується підвищенням рівня моря, сильним скороченням арктичного морського льоду та іншими змінами пов'язаними з кліматом. Вплив зміни клімату на людей і природу стають все більше очевидними. Безпрецедентні повені, теплові повені, теплові хвилі та лісні пожежі нанесли мільярдні збитки. Середовище проживання зазнає швидких змін в відповідь на зміну температури та режим випадання опадів.

Королівське товариство та Національна академія наук США з їхніми подібними місіями, сприяли використанню науки на користь суспільству та для інформування про критичні політичні дебати, створили оригінальний *Climate Change: Evidence and Causes* у 2014 році. Він був написаний і рецензований британо-американською командою провідних кліматологів. Це нове видання, підготовлене тим же авторським колективом, вийшло оновленим останніми кліматичними даними та науковими аналізами, які підкріплюють наше розуміння кліматичних змін, спричинених людиною.

Докази очевидні. Однак, в силу природи науки не всі проблеми можуть бути вирішеними або визначеними до кінця. Не на всі важливі питання ще отримана відповідь.

Наукові докази продовжують збиратись по всьому світу. Деякі ідеї стали більш зрозумілими та з'явилися нові ідеї. Наприклад, період повільного потепління в 2000-х і на початку 2010-х років завершився різким стрибком до більш високих температур в 2014 та 2015 роках. Протяжність антарктичного морського льоду яка збільшувалась, почала зменшуватись в 2014 році, та досягла рекордно низького рівня в 2017 році який зберігається досі. Ці та інші недавні спостереження були взяті до уваги при обговоренні питань, що розглядаються у цій брошурі.

Заклики до дій лунають все голосніше. У дослідженні сприйняття глобальних ризиків 2020 року, Всесвітній економічний форум помістив зміну клімату та пов'язані з ним екологічні проблеми в першу п'ятірку глобальних ризиків, які можуть виникнути протягом наступних десяти років. Тим не менш міжнародній спільноті доведеться ще багато зробити для того, щоб проявити більше амбіцій в відношенні пом'якшення наслідків, адаптації, та інших способів боротьби з зміною клімату.

Наукова інформація є життєво важливим компонентом для прийняття суспільством обґрунтованих рішень про те, як зменшити масштаби змін клімату і як адаптуватись до його наслідків. Ця брошура служить ключовим довідковим документом для осіб - приймаючих рішення: політиків, викладачів, та інших людей, які шукають авторитетні відповіді про теперішній стан науки на рахунок зміни клімату.

Ми вдячні що 6 років тому, під супроводом доктора Ralph J. Cicerone - колишнього президента Національної академії наук, та сера Paul Nurse - колишнього президента Королівського товариства. Ці дві організації спільно підготували огляд науки про зміни в кліматі на високому рівні. Як теперішні президенти ми раді запропонувати оновлення цього ключового довідника завдяки допомозі родини Цицеронів.

Marcia McNutt

Президент Національної академії наук

Venki Ramakrishnan

Президент Королівського товариства

Для подальшого читання

Для більш детального обговорення тем розглянутих в цьому документі (Включаючи посилання на оригінальні дослідження), Дивіться:

- Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC), 2019: Спеціальний звіт про океан і криосферу в умовах зміни клімату [https://www.ipcc.ch/srocc]
- Національні академії наук, техніки та медицини (NASEM), 2019: Технології негативних викидів і Надійний секвестр: програма досліджень [https://www.nap.edu/catalog/25259]
- Королівське товариство, 2018: Видалення парникових газів [https://raeng.org.uk/greenhousegasremoval]
- Програма дослідження глобальних змін США (USGCRP), 2018: Четверта Національна оцінка клімату, том II: вплив, ризику та Адаптація в США [https://nca2018.globalchange.gov]
- IPCC, 2018: Глобальне потепління на 1.5°C [https://www.ipcc.ch/sr15]
- USGCRP, 2017: Четверта національна оцінка клімату, Том I: Клімат Наукові спеціальні звіти [https://science2017.globalchange.go]
- NASEM, 2016: Атрибуція екстремальних погодних явищ у Контексті зміни клімату [https://www.nap.edu/catalog/21852]
- IPCC, 2013: П'ятий звіт про оцінку (AR5), робоча група 1. Зміна клімату 2013: Основи фізичної науки [https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1]
- NRC, 2013: Різкі наслідки зміни клімату: Передчуття сюрпризів [https://www.nap.edu/catalog/18373]
- NRC, 2011: Цілі стабілізації клімату: викиди, концентрації, і вплив від десятиліть до тисячоліть [https://www.nap.edu/catalog/12877]
- Королівське товариство 2010: Зміна клімату: Підсумок науки [https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2010/climate-change-summary-science]
- NRC, 2010: Вибір клімату Америки: розвиток науки. Зміна клімату [https://www.nap.edu/catalog/12782]

Значна частина вихідних даних лежить в основі наук, обговорювані тут висновки доступні за адресою:

- <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

Національна академія наук (NAS) була створена для консультацій Сполучених Штатів, по наукових та технічних питаннях, коли президент Лінкольн підписав статут Конгресу в 1863 році. Національна дослідницька рада, оперативний підрозділ Національної академії наук і Національної інженерної академії, випустив численні звіти про причини змін клімату та можливих заходів у відповідь. Ресурси по змінах клімату від Національної дослідницької ради доступні на сайті nationalacademies.org/climate.

THE
ROYAL
SOCIETY

Королівська наукова організація - це самоврядна спільнота в яке входять багато виданих вчених світу. Її члени представляють всі області науки, техніки та медицини. Вона являється національною академією наук в Великій Британії. Основна мета товариства відбита у його установчому статуті 1660-х років, полягає в признанні, просуванні та підтримці передового досвіду в галузі науки, а також у заохоченні розвитку та використання науки на благо людства. Більш детальну інформацію про роботу Товариства у сфері зміни клімату можна знайти на сайті

available at royalsociety.org/policy/climate-change



NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES

**КОРОЛІВСЬКЕ
ТОВАРИСТВО**

Резюме	2
Запитання та відповіді щодо змін клімату	
1 Клімат потеплішає?.....	3
2 Звідки вчені знають, що останні зміни клімату здебільшого спричинені діяльністю людини?.....	5
3 CO ₂ вже знаходиться в атмосфері природним чином, то чому ж викиди від людської діяльності є значними?	6
4 Яку роль відіграло Сонце в зміні клімату в останні десятиліття?	7
5 Що зміни у вертикальній структурі атмосферної температури – від поверхні до стратосфери – говорять нам про причини нещодавньої зміни клімату?	8
6 Клімат постійно змінюється. Чому зміна клімату зараз викликає занепокоєння?	9
7 Чи нинішній рівень концентрації CO ₂ в атмосфері є безпрецедентним в історії Землі?.....	9
8 Чи є момент, коли додавання більше CO ₂ не призведе до подальшого потепління?	10
9 Чи змінюється швидкість потепління від одного десятиліття до іншого?	11
10 Чи означає уповільнення потепління у 2000-х – на початку 2010-х років що зміна клімату більше не відбувається?	12
Основи зміни клімату	B1–B8
Питання та відповіді щодо зміни клімату (продовження)	
11 Якщо світ стає теплішим, чому деякі зими та літа все ще дуже холодні?	13
12 Чому арктичний морський лід зменшується, а антарктичний морський лід слабо змінився?.....	14
13 Як зміна клімату впливає на силу та частоту повеней, посух, ураганів та торнадо?	15
14 Як швидко піднімається рівень моря?	16
15 Що таке підкислення океану і чому це важливо?	17
16 Наскільки вчені впевнені, що Земля буде нагріватися далі протягом наступного століття?.....	18
17 Чи викликають занепокоєння зміни клімату на кілька градусів?.....	19
18 Що роблять вчені для усунення основних невизначеностей у розумінні кліматичної системи?	19
19 Чи є сценарії катастроф про переломні точки, такі як "відключення Гольфстріму" і викид метану з Арктики, приводом для занепокоєння?	21
20 Якщо припинити викиди парникових газів, чи клімат повернеться до умов 200-річної давності?	22
Висновок.....	23
Подяка	24

ПАРНИКОВІ ГАЗИ такі як вуглекислий газ (CO_2) поглинають тепло (інфрачервоне випромінювання) яке виходить від поверхні землі. Збільшення концентрації цих газів в атмосфері призводить до потепління Землі за рахунок уловлювання великої кількості цього тепла. Діяльність людини - особливо спалювання викопного палива з початку промислової революції - збільшила концентрацію CO_2 в атмосфері більш ніж на 40% причому більше половини приросту відбулося з 1970 року. З 1900 року середня глобальна температура поверхні збільшилась приблизно на 1°C (1.8°F). Це супроводжувалось потеплінням океану, збільшенням рівня моря, сильним скороченням арктичного морського льоду, повсюдним збільшенням частоти та інтенсивності теплових ударів та багатьма іншими факторами. А також багатьма іншими супутніми кліматичними ефектами. Велика частина цього потепління відбулась за останні 5 десятиліть. Детальний аналіз показав - що потепління в цей період результатом збільшення концентрації CO_2 та інших парникових газів. Продовження викидів цих газів викличе подальшу зміну клімату включаючи значне підвищення глобальної середньої температури поверхні, та суттєві зміни регіонального клімату. Масштаби та терміни цих змін будуть залежати від багатьох факторів, від уповільнення та прискорення потепління, що триватимуть десятиліття чи більше, відбуватимуться й надалі. Однак довгострокові зміни клімату протягом багатьох десятиліть залежатимуть, головним чином, від загальної кількості CO_2 та інших парникових газів, викинутих у результаті діяльності людини.



1

Клімат потеплішає?

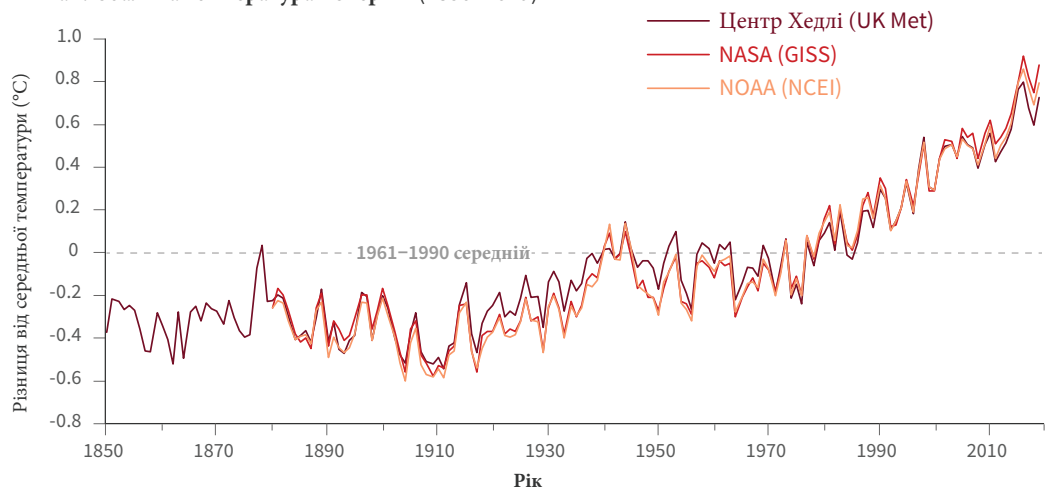
Так. Середня температура повітря біля поверхні землі підвищилась приблизно на 1°C ($1,8^{\circ}\text{F}$) з 1900 року, причому більше половини цього підвищення сталося з середини 1970-х років [Малюнок 1А], широкий спектр інших спостережень (таких як зменшення площі арктичного морського льоду і збільшення теплоємності океану) та ознак з світу природи (таких як зміщення до полюсів чутливих до температури видів тварин, ссавців, комах і т.д.) разом дають незаперечні докази потепління планетарного масштабу.

Найбільш чіткі докази потепління поверхні отримані з широко розповсюджених записів термометрів, які в деяких місцях датуються кінцем 19-го століття. Сьогодні моніторинг температури ведеться в тисячах місць, як на суші так і на поверхні океану. Непрямі оцінки змін температури з таких джерел, як кільця дерев крижані керни, допомагають розглядати недавні зміни температури в контексті минулого. З точки зору середньої температури поверхні Землі, ці непрямі оцінки показують, що 1989-2019 роки, скоріш за все були самим теплим 30-ти літнім періодом за більш ніж 800 років; Останнє десятиліття 2010-2019 роки, являється найбільш теплим десятиліттям в інструментальному літописі (з 1850 року).

Широкий спектр інших спостережень дає більш повну картину потепління у всій кліматичній системі. Наприклад, нижні шари атмосфери та верхні шари океану також потеплішали, сніговий та крижаний покрив в північній півкулі зменшується, Гренландський крижаний щит скорочується, а рівень моря підвищується (Малюнок 1b). Ці вимірювання проводяться за допомогою різних систем моніторингу на суші, в океані та в космосі, що надає додаткової впевненості у реальності глобального потепління клімату Землі.

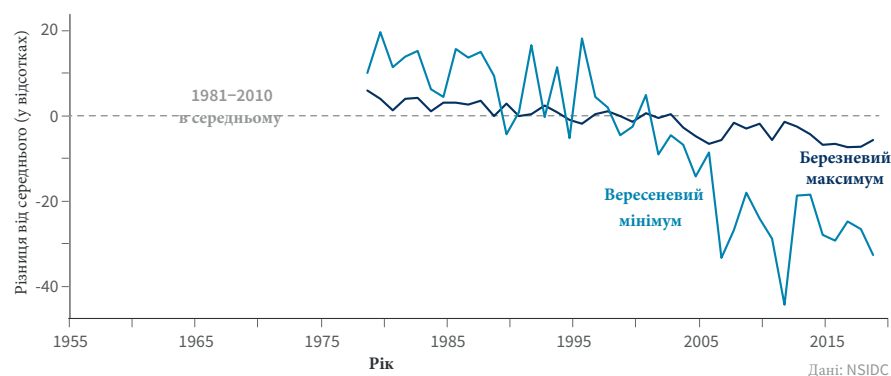
Малюнок 1а. Середня глобальна температура поверхні Землі, як показано на цьому графіку комбінованих вимірів, на суші та в океані з 1850 по 2019 рік, отриманих в результаті трьох незалежних аналізів наявних наборів даних. Зміни температури наведені щодо середньої глобальної температури поверхні у 1961-1990 роках. Джерело: NOAA. Climate.gov; дані британського метеорологічного бюро Хедлі Центр (бордовий), Національне управління США з аеронавтики та дослідження космічного простору Інститут космічних досліджень імені Годдарда (червоний), та Національного управління океанічних та атмосферного управління США Національні центри екологічної інформації (помаранчевий).

Річна глобальна температура поверхні (1850–2019)

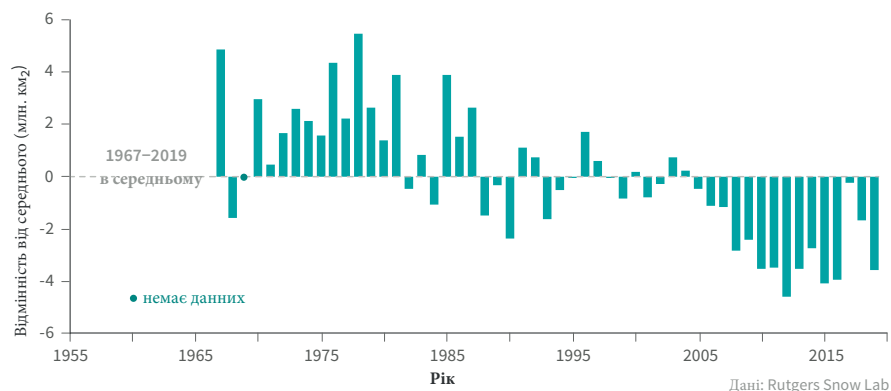


Малюнок 1В. Велика кількість даних спостережень, свідчить про те, що клімат Землі змінюється. Наприклад, додатковими свідченнями тенденції на рахунок потепління являються: різке зменшення площі арктичного морського льоду в період його літнього мінімуму (який спостерігається в вересні), зменшення червеного снігового покриву у Північній півкулі, збільшення середньої глобальної теплоємності верхнього шару океану (верхні 700м або 2300 футів), (Показано щодо середнього значення за 1955-2006 роки) та підвищення рівня світового океану. Джерело: NOAA Climate.gov.

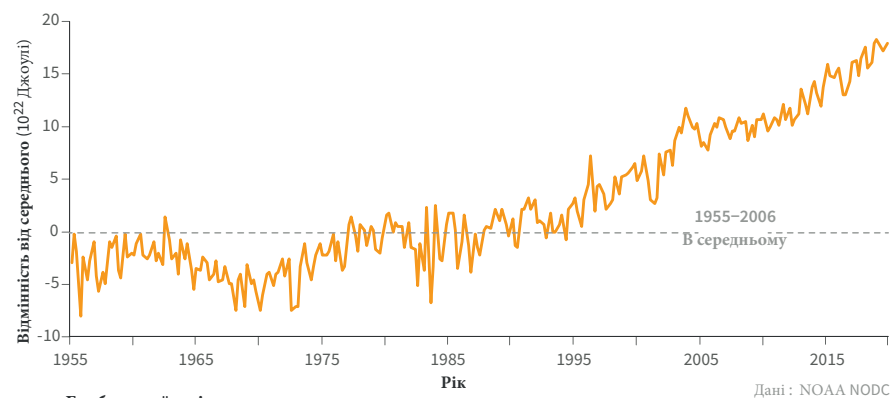
Площа арктичного морського льоду взимку та літку (1979–2019)



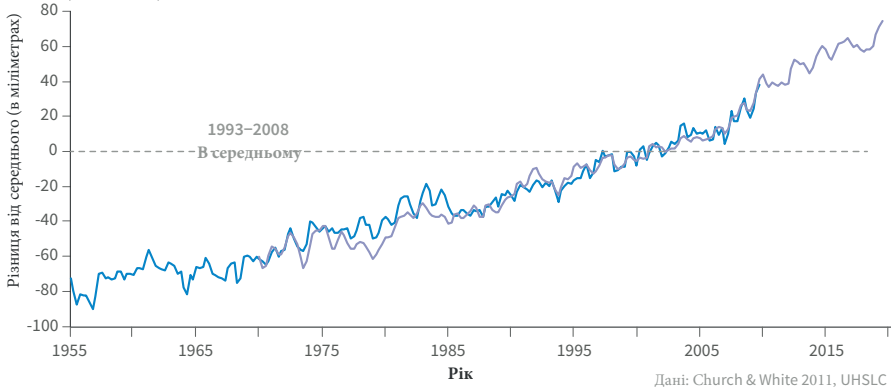
Північна півкуля, червневий сніговий покрив (1967–2019)



Тепловміст верхнього шару океану (1955–2019)



Глобальний рівень моря (1955–2019)



2

Звідки вчені знають, що нещодавня зміна клімату значною мірою спричинена діяльністю людини?

Вченим відомо - що останні зміни клімату значною мірою викликані діяльністю людей, завдяки розумінню основ фізики, зіставленню спостережень з моделями та детальному аналізу закономірностей змін клімату, викликаного різними антропогенними та природними впливами.

З середини 1800-х років вченим стало відомо - що CO₂ являється одним з основних парникових газів, що мають важливе значення для енергетичного балансу Землі. Виміри вмісту CO₂ в атмосфері та в повітрі, зачиненому в льодах, показують, що з 1800 по 2019 рік вміст CO₂ в атмосфері збільшився на 40%. Вимірювання різних форм вуглецю (ізотопів - див. малюнок 3), показують що це збільшення пов'язане з діяльністю людини. Інші парникові гази (в тому числі метан та оксид азоту), також збільшуються в результаті діяльності людей. Спостережуване підвищення температури Землі з 1900 року узгоджується з детальними розрахунками впливу спостережуваного збільшення вмісту парникових газів у атмосфері (та інших змін, викликаних діяльністю людини) на енергетичний баланс Землі.

Різні впливи на клімат, по-різному відображаються в кліматичних записах. Ці унікальні "Відбитки пальців" легше побачити, якщо вийти за рамки одного числа (Наприклад середньої температури Землі), та подивитись на географічні та сезонні закономірності змін клімату. Спостережені закономірності потепління поверхні, змін температури в атмосфері, збільшення теплоємності океану, збільшення вологості атмосфери, підвищення рівня моря та посилення танення суходутних та морських льодів також відповідають закономірності, яку вчені очікують побачити в результаті діяльності людей (див. Питання 5).

Очікувані зміни клімату засновані на нашому розумінні того, як парникові гази затримують тепло. Як це фундаментальне розуміння фізики парникових газів, так і дослідження відбитків пальців, засновані на закономірностях, показують, що лише природні причини недостатні для пояснення змін клімату, що спостерігаються останнім часом. Природні причини включають варіації сонячного випромінювання і орбіти Землі навколо Сонця, виверження вулканів і внутрішні коливання кліматичної системи (такі як Ель-Ніньо і Ла-Нінья). Розрахунки за допомогою кліматичних моделей (див. інфобокс. стор 20). були використані для імітації того, що сталося б із глобальною температурою, якби на кліматичну систему впливали лише природні фактори. Ці моделі дають незначне потепління поверхні або навіть невелике похолодання в 20-му столітті та в 21-му. Тільки коли моделі включають вплив людини на склад атмосфери, отримані зміни температури узгоджуються зі змінами, що спостерігаються.

3

CO₂ вже є в атмосфері природно, чому ж викиди від людської діяльності є значними?

Діяльність людини значно порушила природний кругообіг вуглецю, видобуваючи давно заховане викопне паливо та спалюючи його для отримання енергії, таким чином викидаючи CO₂ в атмосферу.

У природі CO₂ постійно обмінюється між атмосферою, рослинами та тваринами шляхом фотосинтезу, дихання та розкладання, а також між атмосферою та океаном через газообмін. Дуже невелика кількість CO₂ (приблизно 1% рівня викидів від спалювання викопного палива) також викидається під час виверження вулканів. Це врівноважується еквівалентною кількістю, яка видаляється в результаті хімічного вивітрювання порід.

Рівень CO₂ у 2019 році був на 40% вищим, ніж у 19 столітті. Велика частина цього збільшення CO₂ відбулась з 1970 року, приблизно з того часу, коли глобальне споживання енергії збільшилось. Виміряне зменшення часток інших форм вуглецю (ізотопи ¹⁴C і ¹³C) і невелике зниження концентрації кисню в атмосфері (спостереження за якими були доступні з 1990 року) показують, що зростання CO₂ в основному відбувається внаслідок спалювання викопного палива (яке має низькі фракції ¹³C і не містить ¹⁴C). Знищення лісів та інші зміни у землекористуванні також призвели до вивільнення вуглецю з біосфери (живого світу), де він зазвичай перебуває від десятиліть до століть. Додатковий CO₂ від спалювання викопного палива та вирубки лісів порушив баланс вуглецевого циклу, оскільки природні процеси, які могли б відновити баланс, надто повільні порівняно з темпами, з якими людська діяльність викидає CO₂ в атмосферу. У результаті накопичується значна частина CO₂, що викидається в результаті людської діяльності.

В атмосфері, де частина цього залишатиметься не лише десятиліттями чи століттями, а й тисячі років. Порівняння з рівнями CO₂, виміряними в повітрі, витягнутому з кернів льоду, показує, що поточні концентрації значно вищі, ніж вони були принаймні за 800 000 років (див. Запитання 6).



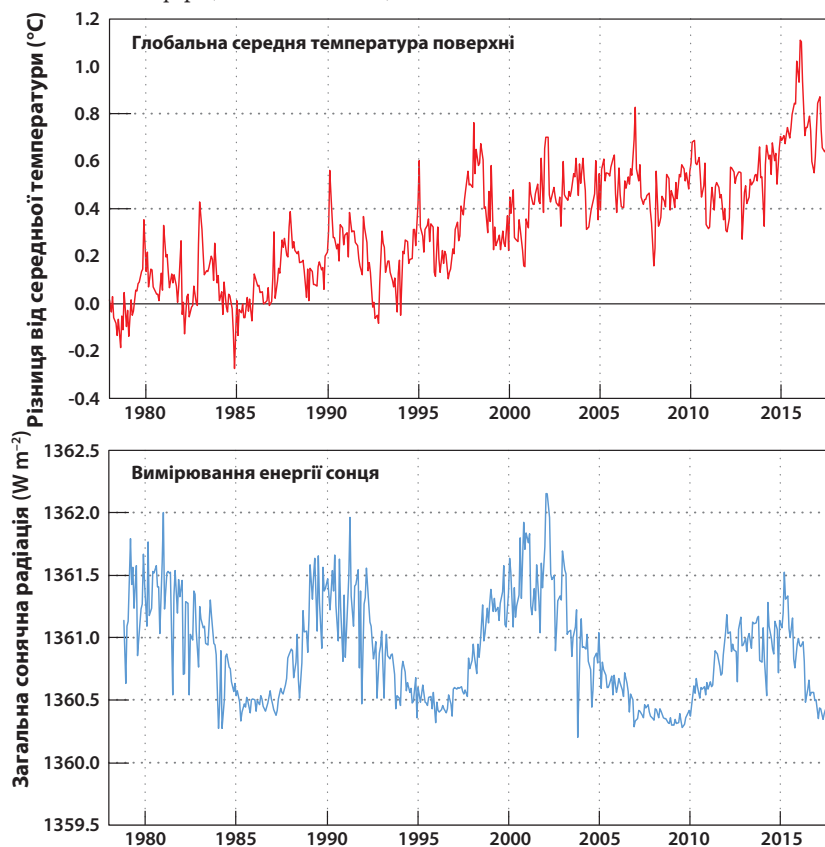
4

Яку роль відіграло Сонце в зміні клімату в останні десятиліття?

Сонце є основним джерелом енергії, що приводить у рух кліматичну систему Землі, але його коливання відіграють дуже незначну роль у кліматичних змінах, що спостерігаються в останні десятиліття. Прямі супутникові виміри з кінця 1970-х років показують відсутність чистого збільшення потужності сонячного випромінювання, тоді як глобальна температура Землі підвищилася [рис. 2].

За періоди до початку супутникових вимірювань відомості про сонячні зміни є менш достовірними, оскільки зміни випливають із непрямих джерел, зокрема кількості сонячних плям і великої кількості певних форм (ізоотопів) атомів вуглецю чи берилію, швидкість виробництва яких у Землі на атмосферу впливають коливання Сонця. Є докази того, що 11-річний сонячний цикл, протягом якого вихідна енергія Сонця змінюється приблизно на 0,1%, може впливати на концентрацію озону, температуру та вітри в стратосфері (шар атмосфери над тропосферою, як правило, від 12 до 50 км) над землею поверхнею, залежно від широти та пори року). Ці стратосферні зміни можуть мати незначний вплив на клімат поверхні протягом 11-річного циклу. Однак наявні дані не вказують на виражені довгострокові зміни у випромінюванні Сонця протягом останнього століття, протягом якого спричинене людиною збільшення концентрації CO₂ було домінуючим впливом на довгострокове глобальне підвищення температури поверхні. Додаткові докази того, що поточне потепління не є результатом сонячних змін, можна знайти в температурних трендах на різних висотах в атмосфері (див. Запитання 5).

Малюнок 2. Вимірювання падіння сонячної енергії на Землю не показують збільшення сонячного впливу протягом останніх 40-ка років, і тому це не може бути основним фактором потепління протягом цього періоду. Дані показують лише невеликі періодичні коливання амплітуди, пов'язані з 11-річним циклом Сонця. Джерело: дані TSI Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, Швейцарія, за новою шкалою VIRGO з 1978 року до середини 2018 року; дані про температуру за той самий період часу з набору даних HadCRUT4, Метеорологічний офіс Великобританії, Центр Хедлі.



5

Від чого залежать зміни вертикальної структури температури атмосфери — від поверхні до стратосфери — розкажіть про причини останніх змін клімату?

Спостережуване потепління в нижніх шарах атмосфери та охолодження у верхніх шарах дають нам ключове розуміння основних причин зміни клімату та показують, що лише природні фактори не можуть пояснити спостережувані зміни.

На початку 1960-х років результати математичних/фізичних моделей кліматичної системи вперше показали, що спричинене людиною збільшення CO₂, як очікується, призведе до поступового нагрівання нижніх шарів атмосфери (тропосфери) та охолодження вищих рівнів атмосфери (стратосфери). Навпаки, збільшення випромінювання Сонця нагріє як тропосферу, так і всю вертикальну протяжність стратосфери. На той час не було достатньо даних про спостереження, щоб перевірити це передбачення, але вимірювання температури з повітряних куль і супутників підтвердили ці ранні прогнози. Зараз відомо, що спостережувана картина тропосферного потепління та стратосферного охолодження за останні 40 років в основному узгоджується з комп'ютерним моделюванням, яке включає збільшення CO₂ та зменшення стратосферного озону, кожне з яких викликано діяльністю людини. Спостережувана закономірність не узгоджується з чисто природними змінами у виробленні енергії Сонця, вулканічною активністю або природними змінами клімату, такими як Ель-Ніньо та Ла-Нінья.

Незважаючи на таку узгодженість між глобальними моделями змодельованої та спостережуваної зміни температури атмосфери, все ще є деякі відмінності. Найпомітніші відмінності спостерігаються в тропіках, де моделі наразі показують більше потепління в тропосфері, ніж спостерігалось, і в Арктиці, де спостережуване потепління тропосфери більше, ніж у більшості моделей.



6

Клімат постійно змінюється. Чому зміна клімату зараз викликає занепокоєння?

Усі серйозні зміни клімату, у тому числі природні, є руйнівними. Зміни клімату в минулому призвели до вимирання багатьох видів, міграцій, популяцій і виражених змін у поверхні суші та циркуляції океану. Швидкість поточної зміни клімату є швидшою, ніж більшість подій минулого, що ускладнює адаптацію людського суспільства та світу природи.

Найбільші кліматичні коливання глобального масштабу в недавньому геологічному минулому Землі – це цикли льодовикового періоду (див. інфобокс, стор. В4), які являють собою холодні льодовикові періоди, за якими слідує коротші теплі періоди [Малюнок 3]. Кілька останніх із цих природних циклів повторювалися приблизно кожні 100 000 років. Вони в основному викликані повільними змінами орбіти Землі, які змінюють спосіб розподілу енергії Сонця залежно від широти та пори року на Землі. Ці орбітальні зміни дуже незначні за останні кілька сотень років, і їх самих по собі недостатньо, щоб спричинити спостережувану величину зміни температури з часів промислової революції або вплинути на всю Землю. У часовому масштабі льодовикового періоду ці поступові зміни орбіти призвели до змін у розмірах льодовикових щитів і кількості CO₂ та інших парникових газів, що, у свою чергу, посилює початкову зміну температури.

За останніми оцінками підвищення середньої глобальної температури з кінця останнього льодовикового періоду становить від 4 до 5 °C (від 7 до 9 °F). Ця зміна відбулася протягом приблизно 7000 років, починаючи з 18 000 років тому. Лише за останні 200 років рівень CO₂ зріс більш ніж на 40%, переважно з 1970-х років, сприяючи зміні людиною енергетичного бюджету планети, який наразі нагріває Землю приблизно на 1 °C (1,8 °F). Якщо зростання CO₂ продовжуватиметься нестримним чином, до кінця цього століття або незабаром після цього можна очікувати потепління такого ж масштабу, як збільшення після льодовикового періоду. Ця швидкість потепління більш ніж у десять разів перевищує швидкість наприкінці льодовикового періоду, найшвидшу відому природну стійку

7

Чи є нинішній рівень атмосферної концентрації CO₂ безпрецедентним в історії Землі?

Нинішній рівень концентрації CO₂ в атмосфері напевно безпрецедентний за останні мільйони років, протягом яких відбувалася еволюція сучасної людини та розвиток суспільства. Однак у більш віддаленому минулому Землі (багато мільйонів років тому) концентрація CO₂ в атмосфері була вищою, і тоді, згідно з палеокліматичними та геологічними даними, температура і рівень моря також були вищими, ніж сьогодні.

Вимірювання повітря в кернах льоду показують, що протягом останніх 800 000 років, аж до 20-го століття, концентрація CO₂ в атмосфері залишалася в діапазоні від 170 до 300 частин на мільйон (ppm), що призвело до стрімкого зростання до понад 400 частин на мільйон за 200 років, особливо примітний [малюнок 3]. Протягом льодовикових циклів за останні 800 000 років як CO₂, так і метан діяли як важливі підсилювачі кліматичних змін, викликаних коливаннями орбіти Землі навколо Сонця. У міру нагрівання Землі після останнього льодовикового періоду, температура

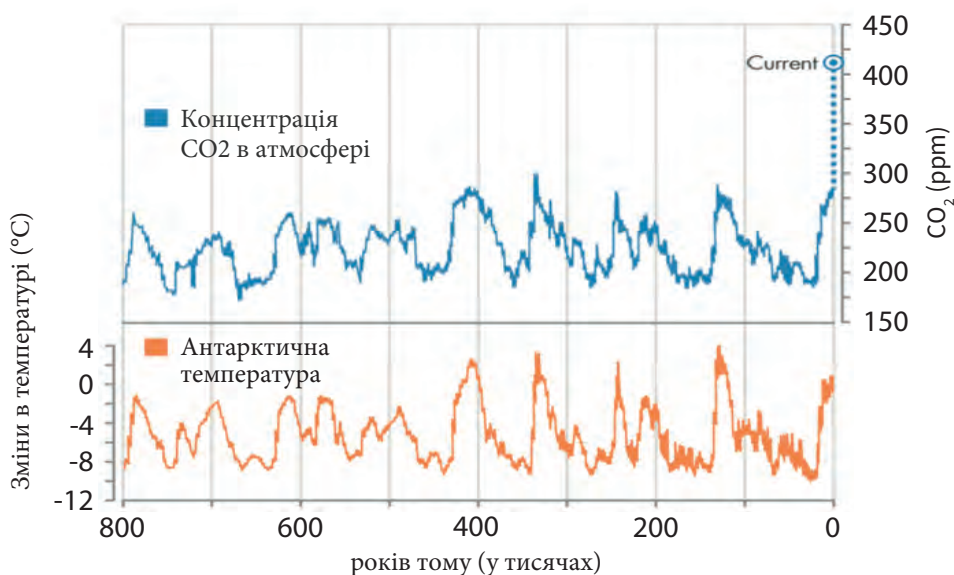
продовження далі

■ Питання та відповіді

Малюнок 3. Дані з крижаних кернів були використані для реконструкції температури Антарктики та концентрації CO₂ в атмосфері протягом останніх 800 000 років. Температура заснована на вимірюваннях ізотопного складу води в крижаному керні Dome C. CO₂ вимірюється в повітрі, замкненому у льоді, і є композитом з крижаних кернів Dome C і Vostok. Поточна концентрація CO₂ (Синя точка) отримана з атмосферних вимірювань. Циклічний характер коливань температури становить цикли льодовикового періоду/міжледників. Під час цих циклів зміни концентрації CO₂ (синя позначка) тісно пов'язані із змінами температури (помаранчева позначка). Як показують записи, нещодавнє збільшення концентрації CO₂ у атмосфері є безпрецедентним протягом останніх 800 000 років. У 2016 році концентрація CO₂ в атмосфері перевищила 400 проміле, а середня концентрація у 2019 році склала понад 411 проміле. Джерело: На основі малюнка Джеремі Шакуна, дані Lüthi et al., 2008 та Jouzel et al., 2007.

і CO₂ почав зростати приблизно в той же час і продовжував зростати в тандемі приблизно від 18 000 до 11 000 років тому. Зміни в температурі океану, циркуляції, хімії та біології спричинили викид CO₂ в атмосферу, який у поєднанні з іншими зворотними зв'язками підштовхнув Землю до ще теплішого стану.

Для попередніх геологічних часів концентрації CO₂ і температури були визначені менш прямими методами. Вони припускають, що концентрація CO₂ востаннє наближалася до 400 частин на мільйон приблизно 3-5 мільйонів років тому, період, коли середня глобальна температура поверхні, за оцінками, була приблизно на 2-3,5 °C вищою, ніж у доіндустріальний період. 50 мільйонів років тому CO₂ міг досягати 1000 частин на мільйон, а середня глобальна температура була приблизно на 10 °C вище, ніж сьогодні. За тих умов на Землі було мало льоду, а рівень моря був щонайменше на 60 метрів вищим за нинішній рівень.



8

Чи існує точка, в якій додавання більшої кількості CO₂ не призведе до подальшого потепління?

Ні. Додавання більшої кількості CO₂ в атмосферу призведе до підвищення температури поверхні. У міру збільшення концентрації CO₂ в атмосфері додавання додаткового CO₂ стає все менш ефективним для утримання енергії Землі, але температура поверхні все одно зростатиме.

Наше розуміння фізики впливу CO₂ на енергетичний баланс Землі підтверджується лабораторними вимірюваннями, а також докладними супутниковими та поверхневими спостереженнями за випромінюванням та поглинанням інфрачервоної енергії атмосферою. Парникові гази поглинають частину інфрачервоної енергії, яку випромінює Земля, у так званих смугах сильнішого поглинання, що виникають на певних довжинах хвиль. Різні гази поглинають енергію на різних довжинах хвиль. У CO₂ найсильніша смуга поглинання тепла зосереджена на довжині хвилі 15 мікрометрів (мільйонних часток метра), а поглинання поширюється на кілька мікрометрів в обидві сторони. Існує також безліч слабших смуг поглинання. При збільшенні концентрації CO₂ поглинання в центрі сильної смуги вже настільки інтенсивне, що не має великої ролі у виникненні додаткового потепління. Однак більше енергії поглинається в слабкіших смугах і далеко від центру сильної смуги, викликаючи подальше потепління поверхні та нижніх шарів атмосфери.

9

Чи змінюються темпи потепління від одного десятиліття до іншого?

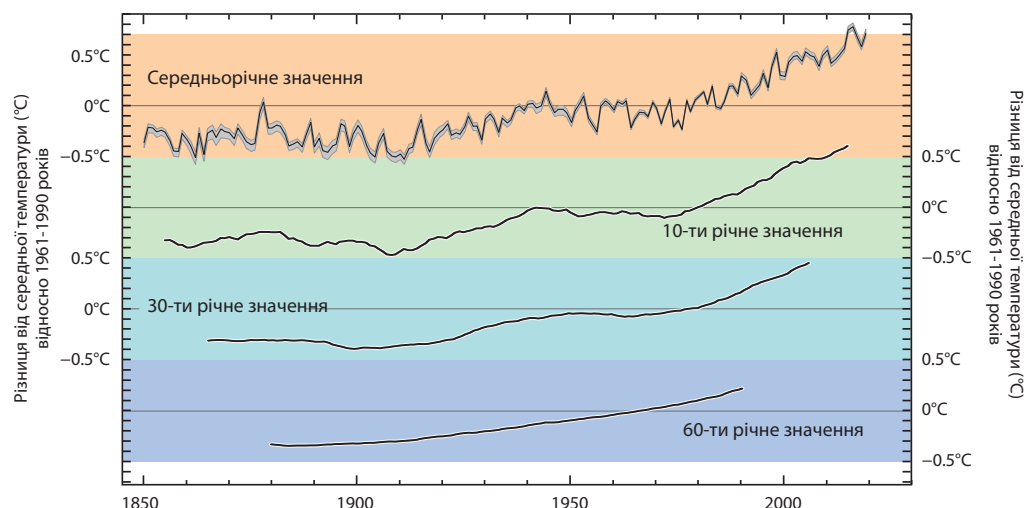
Так. Спостережуваний темп потепління змінюється з року в рік, від десятиліття до десятиліття та від місця до місця, як і очікується з нашого розуміння кліматичної системи. Ці короткострокові коливання в основному обумовлені природними причинами і не суперечать нашому фундаментальному розумінню того, що довгострокова тенденція потепління зумовлена в основному антропогенними змінами в атмосферних рівнях CO₂ та інших парникових газів.

Незважаючи на те, що CO₂ в атмосфері постійно зростає, що призводить до поступового потепління Землі, багато природних факторів модулюють це довгострокове потепління. Великі вулканічні виверження збільшують кількість дрібних частинок у стратосфері. Ці частки відбивають сонячне світло, що призводить до короточасного охолодження поверхні, що триває зазвичай два-три роки, за яким слідує повільне відновлення. Океанічна циркуляція та перемішування змінюються природним чином у багатьох часових масштабах, викликаючи коливання температури поверхні моря, а також зміни швидкості перенесення тепла на велику глибину. Наприклад, у тропічній частині Тихого океану відбуваються коливання між теплим Ель-Ніньо та холоднішим Ла-Нінья протягом двох-семи років. Вчені вивчають безліч різних типів кліматичних коливань, наприклад, коливання в десятирічному та сторічному масштабі у Тихому та Північно-Атлантичному океанах. Кожен тип варіацій має унікальні характеристики. Ці океанічні варіації пов'язані зі значними регіональними та глобальними зрушеннями у температурному режимі та режимі опадів, які видно зі спостережень.

На потепління від десятиліття до десятиліття також можуть впливати людські фактори, такі як коливання викидів парникових газів та аерозолів (часток у повітрі, які можуть надавати як зігрівальну, так і охолодну дію) від вугільних електростанцій та інших джерел забруднення.

Ці коливання температурного тренду чітко простежуються в температурному записі, що спостерігається. [Малюнок. 4]. Короткострокові природні коливання клімату можуть також впливати на довгостроковий сигнал антропогенної зміни клімату і навпаки, оскільки коливання клімату у різних просторових та часових масштабах можуть взаємодіяти один з одним. Частково з цієї причини прогнози зміни клімату складаються з використанням кліматичних моделей (див. інфобокс, стор. 20), які можуть враховувати безліч різних типів кліматичних коливань та їхню взаємодію. Надійні висновки про зміну клімату, викликану людиною, повинні бути зроблені з урахуванням більш тривалого періоду часу, використовуючи записи, що охоплюють багато десятиліть.

Рисунок 4. Кліматична система змінюється природним чином рік у рік і від десятиліття до десятиліття. Щоб зробити надійні висновки про антропогенну зміну клімату, зазвичай використовуються дані за кілька десятиліть та триваліший період. Обчислення "змінного середнього" на цих більш тривалих часових інтервалах дозволяє легше побачити довгострокові тенденції. Для середньої глобальної температури за період 1850–2019 років (з використанням даних Центру Хедлі Метеорологічного управління Великобританії щодо середнього значення 1961–90 років), графіки показують (вгорі) середнє значення та діапазон невизначеності для середньорічних даних; (2-й графік) середньорічну температуру за десять років із центром на будь-якій конкретній даті; (3-й графік) еквівалентну картину для 30-річних та (4-й графік) 60-річних середніх значень. Джерело: Центр Хедлі Метрополітену, на основі набору даних HadCRUT4 Метрополітену та Групи кліматичних досліджень (Morice et al., 2012).



10

Чи означає уповільнення потепління у 2000-х – на початку 2010-х років, що зміна клімату більше не відбувається?

Ні. Після дуже теплого 1998 року, який пішов за сильним Ель-Ніньо 1997-98 років, зростання середньої температури поверхні сповільнилося порівняно з попереднім десятиліттям швидкого зростання температури. Незважаючи на уповільнення темпів потепління, 2000-ті роки були теплішими, ніж 1990-ті. Обмежений період сповільненого потепління завершився різким стрибком до тепліших температур у 2014-2015 роках, причому всі роки з 2015 по 2019 рік були теплішими, ніж будь-який попередній рік в інструментальному записі. Короточасне уповільнення потепління Землі не позбавляє нас розуміння довгострокових змін глобальної температури, викликаних антропогенними змінами в парникових газах.

Десятиліття повільного потепління, і навіть десятиліття прискореного потепління відбуваються у кліматичній системі природним чином. Десятиліття, які є холодними чи теплими порівняно з довгостроковою тенденцією, видно у спостереженнях за останні 150 років і також фіксуються кліматичними моделями. Оскільки атмосфера зберігає дуже мало тепла, температура поверхні може швидко змінюватися внаслідок поглинання тепла в інших частинах кліматичної системи та зміни зовнішніх впливів на клімат (наприклад, частинок, що утворюються з матеріалу, високо піднятого в атмосферу при виверженнях вулканів).

Понад 90% тепла, що надійшло у Земну систему за останні десятиліття, було поглинено океанами і лише повільно проникає у глибокі води. Більша швидкість проникнення тепла в глибини океану уповільнить потепління, що спостерігається на поверхні та в атмосфері, але сама по собі вона не змінить довгострокового потепління, яке походить від даної кількості CO₂. Наприклад, останні дослідження показують, що під час теплих Ель-Ніньо з океану в атмосферу надходить деяка кількість тепла, а під час холодних Ла-Ніньо більше тепла проникає в глибини океану. Такі зміни відбуваються неодноразово протягом десятиліть та більше. Прикладом може бути велика подія Ель-Ніньо в 1997-98 роках, коли середньосвітова температура повітря піднялася до найвищого рівня в 20 столітті, оскільки океан втрачав тепло в атмосферу, в основному за рахунок випаровування.

Навіть під час уповільнення зростання середньої температури поверхні довготривала тенденція потепління, все ще була очевидною (див. Малюнок 4). За цей період, наприклад, було зафіксовано рекордні теплові хвилі в Європі (літо 2003 року), у Росії (літо 2010 року), у США (липень 2012 року) та в Австралії (січень 2013 року). Кожне з останніх чотирьох десятиліть було тепліше, ніж будь-яке попереднє десятиліття з того часу, як у 1850-х роках було введено повсюдні термометричні виміри. Наслідки потепління клімату, що продовжуються, виявляються в тенденціях збільшення теплоємності океану і рівня моря, а також у таненні арктичного морського льоду, льодовиків і Гренландського крижаного щита.



Основи зміни клімату

Парникові гази впливають на енергетичний баланс Землі та клімат.

Сонце є основним джерелом енергії для клімату Землі. Частина сонячного світла, що надходить, відбивається безпосередньо назад в космос, особливо від яскравих поверхонь, таких як лід і хмари, а решта поглинається поверхнею і атмосферою. Більшість поглиненої сонячної енергії перевипромінюється у вигляді тепла (довгохвильове або інфрачервоне випромінювання). Атмосфера, у свою чергу, поглинає та перевипромінює тепло, частина якого йде в космос. Будь-яке порушення цього балансу вхідної та вихідної енергії впливає на клімат. Наприклад, невеликі зміни у виході енергії від Сонця впливають на цей баланс.

Якби вся теплова енергія, що випромінюється з поверхні Землі, проходила через атмосферу прямо в космос, середня температура поверхні Землі була б на десятки градусів холоднішою, ніж сьогодні. Парникові гази в атмосфері, включаючи водяну пару, двоокис вуглецю, метан і закис азоту, роблять поверхню набагато теплішою, ніж зараз, оскільки вони поглинають і випромінюють теплову енергію у всіх напрямках (у тому числі вниз), зберігаючи поверхню Землі та нижні шари атмосфери теплими [Малюнок В1]. Без цього парникового ефекту життя, яке ми його знаємо, не змогло б розвиватися на планеті. Додавання в атмосферу більшої кількості парникових газів робить її ще більш ефективною у плані запобігання витоку тепла в космос. Коли енергії, що йде, стає менше, ніж надходить, Земля нагрівається до тих пір, поки не встановиться новий баланс.

малюнок В1. Парникові гази в атмосфері, включаючи водяну пару, вуглекислий газ, метан і закис азоту, поглинають теплову енергію та випромінюють її у всіх напрямках (у тому числі вниз), підтримуючи тепло на поверхні Землі та в нижній атмосфері. Додавання в атмосферу більшої кількості парникових газів посилює цей ефект, роблячи поверхню Землі та нижні шари атмосфери ще теплішими. Зображення ґрунтується на малюнку Агентства з охорони навколишнього середовища США.



Парникові гази, що утворюються в результаті людської діяльності, змінюють енергетичний баланс Землі і, отже, її клімат. Люди також впливають на клімат, змінюючи природу поверхні землі (наприклад, вирубуючи ліси для ведення сільського господарства) і через викиди забруднюючих речовин, які впливають на кількість і тип частинок в атмосфері.

Вчені визначили, що, якщо врахувати всі людські та природні фактори, кліматичний баланс Землі змінився в бік потепління, причому найбільший внесок у це вносить збільшення CO₂

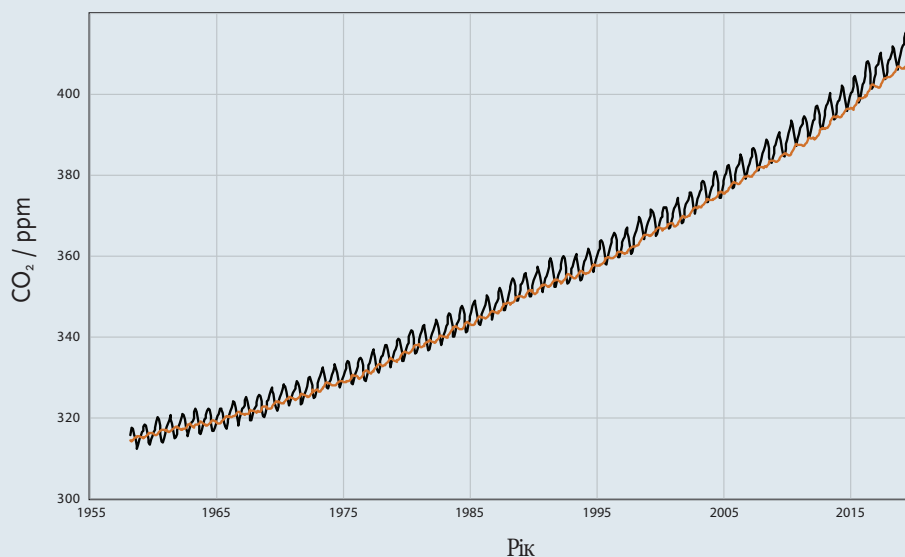
Діяльність людини додала парникових газів в атмосферу.

Концентрація вуглекислого газу, метану та закису азоту в атмосфері значно збільшилася з початку промислової революції. У випадку вуглекислого газу середня концентрація, виміряна в обсерваторії Мауна-Лоа на Гавайях, зросла з 316 частинок на мільйон (ppm) у 1958 році (перший повний рік доступних даних) до більш ніж 411 ppm у 2019 [малюнок. 2]. З того часу такі ж темпи зростання були зареєстровані на багатьох інших станціях по всьому світу. З доіндустріальних часів концентрація CO₂ у атмосфері збільшилася більш ніж 40%, метану - більш ніж на 150%, а закису азоту - приблизно на 20%. Понад половину приросту CO₂ сталося з 1970 року. Збільшення вмісту всіх трьох газів сприяє потеплінню Землі, при цьому найбільшу роль відіграє збільшення вмісту CO₂. (стор. В3, щоб дізнатися про джерела парникових газів, що викидаються людиною.

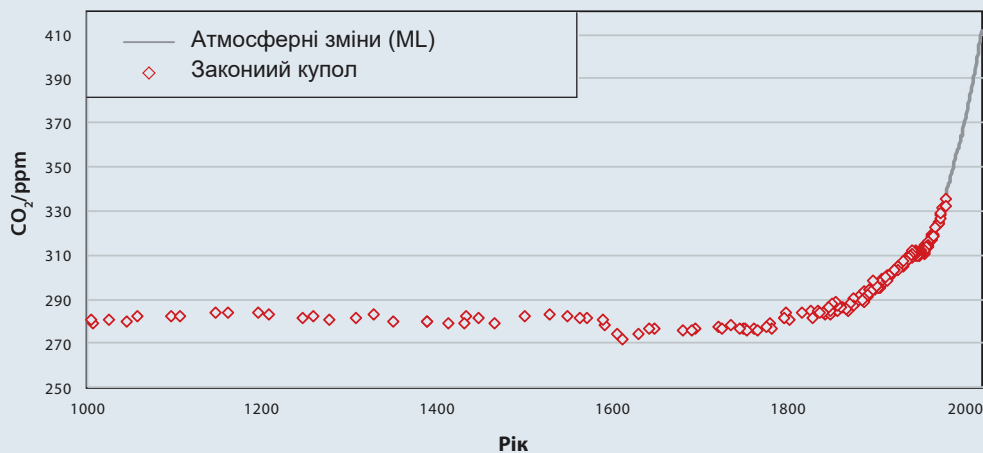
Вчені розглянули парникові гази у контексті минулого. Аналіз повітря, замкненого всередині льоду, що накопичувався з часом в Антарктиді, показує, що CO₂

1 тобто на кожен мільйон молекул у повітрі, 316 із них були молекулами CO₂

Малюнок. В2. Вимірювання концентрації CO₂ в атмосфері з 1958 року в обсерваторії Мауна-Лоа на Гавайях (чорний колір) та на Південному полюсі (червоний колір) показують стійке щорічне зростання концентрації CO₂ в атмосфері. Вимірювання проводяться в таких віддалених місцях, оскільки на них не впливають місцеві процеси, тому вони репрезентативні для фонові атмосфери. Дрібний візерунок із зубцями вгору та вниз відображає сезонні зміни у вивільненні та поглинанні CO₂ рослинами.



концентрація CO₂ почала значно збільшуватися в 19 столітті [Малюнок В3] після того, як вона залишалася в діапазоні від 260 до 280 ppm протягом попередніх 10 000 років. Записи крижаних кернів за 800 000 років показують, що протягом цього часу концентрація CO₂ залишалася в діапазоні від 170 до 300 ppm протягом багатьох циклів "льодовикового періоду" (див. інфобокс, стор. В4, щоб дізнатися про льодовикові періоди), і концентрація вище 300 ppm не спостерігалася у записах крижаних кернів до останніх 200 років.



Малюнок В3. Зміни CO₂ за останні 1000 років, отримані в результаті аналізу повітря, розпочатого в ледяному керні, витягнутому з Антарктиди (червоні квадрати), показують різкий ріст атмосферного CO₂, починаючи з кінця 19 століття. Сучасні атмосферні виміри з Мауна-Лоа накладені сірим кольором. Джерело: малюнок Еріка Вольфа, дані Etheridge et al., 1996; MacFarling Meure та ін., 2006; Програма CO₂ Скріпса.

Дізнайтеся про джерела парникових газів, виділених людиною:

- **Вуглекислий газ (CO₂)** має як природні, так і антропогенні джерела, але рівень CO₂ зростає в основному через спалювання викопних видів палива, виробництва цементу, декору (яка зменшує кількість CO₂, поглинутих деревами, і збільшує кількість CO₂, виділеного при розкладанні залишків) та інших змін в землекористуванні. Збільшення вмісту CO₂ є єдиним найбільшим фактором, що сприяє глобальному потеплінню.
- **Метан (CH₄)** має як антропогенні, так і природні джерела, і його рівень значно виріс в доіндустріальні часи через діяльність людей, такий як розведення скота, вирощування рису, заповнення звалищ і використання природного газу (який в основному складається з CH₄, частина якого може вивільнятися при його видобутку, транспортуванні та використанні).
- **Закис азоту (N₂O)** концентрація збільшилася в основному - через сільськогосподарську діяльність, таку як використання азотних добрив, та змін у землекористуванні.
- **Галогеновуглеводні**, включаючи хлорфторвуглеці (ХФВ), є хімічними речовинами, що використовуються як холодоагенти та антипірени. Крім того, ХФВ є потужними парниковими газами, вони також руйнують озоновий шар. В даний час виробництво більшості ХФВ заборонено, тому їхня дія починає знижуватися. Однак багато замінників ХФУ також є потужними парниковими газами, їх концентрація, а також концентрація інших галогідних вуглеводнів продовжує знижуватися. інших галогідних вуглеводнів продовжують зростати.



Вимірювання форм (ізоотопів) вуглецю в сучасній атмосфері показують чіткий відбиток додавання "старого" вуглецю (збідненого природним радіоактивним ^{14}C), що надходить від спалювання викопного палива (на відміну від "новішого" вуглецю, що надходить від живих систем). Крім того, відомо, що діяльність людини (за винятком змін у землекористуванні) в даний час викидає приблизно 10 мільярдів тонн вуглецю щорічно, в основному за рахунок спалювання викопного палива, що більш ніж достатньо для пояснення зростання концентрації, що спостерігається. Ці та інші докази незаперечно свідчать про те, що підвищена концентрація CO_2 у нашій атмосфері є результатом діяльності людини.

Кліматичні дані показують тенденцію до потепління.

Оцінка зростання глобальної середньої приземної температури повітря потребує ретельного аналізу мільйонів вимірювань з усього світу, у тому числі з наземних станцій, кораблів та супутників. Незважаючи на численні складнощі, пов'язані з узагальненням таких даних, численні незалежні групи експертів дійшли окремого та однозначного висновку про те, що з 1900 року середня глобальна приземна температура повітря підвищилася приблизно на 1°C ($1,8^\circ\text{F}$) [Малюнок В4]. Незважаючи на те, що в цій тенденції спостерігається кілька пауз та прискорень, кожне з останніх чотирьох десятиліть було тепліше, ніж будь-яке інше десятиліття в інструментальному літописі з 1850 року. Якщо повернутися ще далі в минуле, перш ніж точні термометри стали широко доступними, то температуру можна реконструювати за допомогою чутливих до клімату показників "проксі".

Дізнайтеся про льодовикові періоди:

Детальний аналіз океанічних відкладень, крижаних кернів та інших даних показує, що принаймні за останні 2,6 мільйона років Земля пережила тривалі періоди, коли температура була набагато нижчою, ніж сьогодні, а товсті крижані покриви покривали великі території Північної півкулі. Ці тривалі періоди похолодання, що тривали в останніх циклах близько 100 000 років, переривалися більш короткими теплими "міжледниковими" періодами, включаючи останні 10 000 років.

Завдяки поєднанню теорії, спостережень і моделювання вчені дійшли висновку, що льодовикові періоди* викликаються коливаннями орбіти Землі, що повторюються, які в першу чергу змінюють регіональний і сезонний розподіл сонячної енергії, яка досягає Землі. Ці відносно невеликі зміни в сонячній енергії посилюються протягом тисяч років поступовими змінами в крижаному покриві Землі (кріосфері), особливо в Північній півкулі, та у складі атмосфери, що зрештою призводить до великих льодовикових періодів.

Зміни глобальної температури.

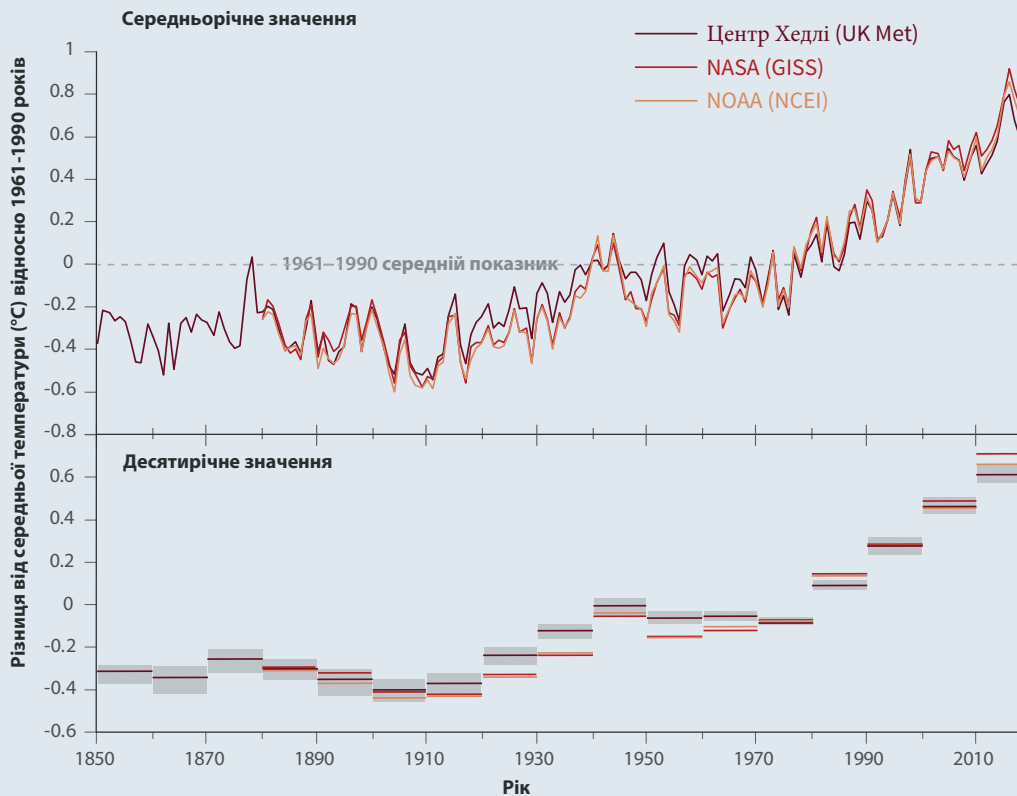
Середня зміна глобальної температури протягом циклу льодовикового періоду оцінюється як $5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ($9^\circ\text{F} \pm 2^\circ\text{F}$).

**Зверніть увагу, що з геологічної точки зору, Земля переживає льодовиковий період відколи - Антарктичний льодовиковий щит сформувався, близько 36 мільйонів років тому. Однак у цьому документі ми використовуємо цей термін у більш розмовному значенні, вказуючи на регулярну появу великих крижаних щитів над Північною Америкою та північною Євразією.*



У таких матеріалах, як кільця дерев, крижані керни та морські відкладення. Порівняння показань термометрів із цими непрямыми вимірами дозволяє припустити, що з початку 1980-х був найтеплішим 40-річним періодом, принаймні, за останні вісім століть, і що глобальна температура зростає у бік пікових температур, які спостерігалися востаннє 5000 -10 000 років тому у найтеплішій частині нинішнього міжльодовикового періоду.

Багато інших наслідків, пов'язаних із тенденцією потепління, стали очевидними за останні роки. Арктичний літній морський крижаний покрив різко скоротився. Теплоємність океану збільшилась. Середній рівень світового океану з 1901 року піднявся приблизно на 16 см (6 дюймів), що пов'язано як з розширенням більш теплої океанської води, так і додаванням талих вод з льодовиків і крижаних щитів на суші. Потепління та опади змінюють географічні ареали багатьох видів рослин та тварин та терміни їх життєвих циклів. Крім впливу на клімат, частина надлишкового CO₂ у атмосфері поглинається океаном, змінюючи його хімічний склад (викликаючи закислення океану).



Малюнок В4. Середня глобальна температура поверхні Землі підвищилася, як показано на цьому графіку комбінованих вимірів суші та океану з 1850 до 2019 року, отриманих в результаті трьох незалежних аналізів наявних наборів даних. На верхній панелі показані середньорічні значення з трьох аналізів, а на нижній панелі – десятирічні середні значення, включаючи діапазон невизначеності (сірі смуги) для бордового набору даних (HadCRUT4). Зміни температури наведені щодо середньої глобальної температури поверхні, усередненої за 1961-1990 роки.

джерело:

NOAA Climate.gov на основі IPCC AR5. Дані Центру Хедлі (бордовий), Інституту космічних досліджень Годдарда, Національного управління США з аеронавтики та дослідження космічного простору (червоний), та Національних центрів екологічної інформації, Національного управління океанічних та атмосферних досліджень США (помаранчевий).

Багато складних процесів формують наш клімат.

Виходячи лише з фізики, кількості енергії що поглинається та виділяється CO₂, подвоєння концентрації CO₂ в атмосфері порівняно з доіндустріальним рівнем (приблизно до 560 ppm) саме собою викликає підвищення середньої глобальної температури приблизно на 1 °C (1,8 °F). Проте в загальній кліматичній системі все набагато складніше: потепління призводить до подальших ефектів (зворотних зв'язків), які посилюють або послаблюють початкове потепління.



Найбільш важливі зворотні зв'язки з різними формами води. Тепліша атмосфера зазвичай містить більше водяної пари. Водяна пара є потужним парниковим газом, що призводить до швидшого потепління; його короткий час життя в атмосфері дозволяє йому збільшуватися значною мірою відповідно до потепління. Таким чином, водяна пара розглядається як підсилювач, а не рушійна сила зміни клімату. Підвищення температури в полярних регіонах призводить до танення морського льоду та скорочення сезонного снігового покриву, оголюючи більш темну поверхню океану та суші, яка може поглинати більше тепла, спричиняючи подальше потепління. Інша важлива, але невизначена зворотний зв'язок із змінами у хмарах. Потепління та збільшення кількості водяної пари разом можуть викликати збільшення або зменшення хмарного покриву, що може посилити або послабити зміну температури залежно від зміни горизонтальної протяжності, висоти та властивостей хмар. Остання наукова оцінка показує, що загальний глобальний ефект від зміни хмарності, швидше за все, полягатиме у посиленні потепління.

Океан стримує зміну клімату. Океан є величезним резервуаром тепла, але його важко нагріти на всю глибину, оскільки тепла вода має тенденцію залишатися біля поверхні. Тому швидкість передачі тепла у глибини океану повільна; вона змінюється з року в рік і від десятиліття до десятиліття, і це допомагає визначити темпи потепління на поверхні. Спостереження за підповерхневим шаром океану обмежені до 1970 року, але з того часу потепління верхніх шарів 700 м (2 300 футів) цілком очевидне, а потепління глибин також чітко простежується приблизно з 1990 року.

Температура поверхні та кількість опадів у більшості регіонів значно відрізняються від середньосвітового значення через географічне положення, зокрема, широти та положення континенту. Як середні значення температури, опадів, так і їх екстремальні значення (які зазвичай мають найбільший вплив на природні системи та людську інфраструктуру), також сильно залежать від місцевих вітрів.

Оцінка впливу процесів зворотного зв'язку, темпів потепління та регіональних змін клімату потребує використання математичних моделей атмосфери, океану, суші та льоду. (Кріосфера), побудованих на основі встановлених законів фізики та новітнього розуміння фізичних, хімічних та біологічних процесів, що впливають на клімат, і працюють на потужних комп'ютерах. Моделі різняться у своїх прогнозах щодо того, якого додаткового потепління слід очікувати (залежно від типу моделі та припущень, що використовуються при моделюванні певних кліматичних процесів, зокрема, утворення хмар та змішування океану), але всі такі моделі погоджуються з тим, що загальний ефект зворотного зв'язку полягає у посиленні потепління.

Людська діяльність змінює клімат.

Суворий аналіз всіх даних і доказів показує, що більшість спостережуваного глобального потепління за останні 50 років або близько того не може бути пояснена природними причинами і натомість вимагає значної ролі впливу людської діяльності.

Щоб визначити вплив людини на клімат, вчені повинні враховувати безліч природних варіацій, які впливають на температуру, опади та інші аспекти клімату від локальних до глобальних масштабів, на тимчасових шкалах від днів до десятиліть і більше. Одним із природних коливань є південне коливання Ель-Ніньо (ENSO) - нерегулярне чергування потепління та похолодання (тривалістю від двох до семи років) в екваторіальній частині Тихого океану, яке спричиняє значні щорічні регіональні та глобальні зміни температури та кількості опадів. Вулканічні виверження також змінюють клімат, частково збільшуючи кількість дрібних (аерозольних) частинок у стратосфері, які відбивають або поглинають сонячне світло, що призводить до короткочасного охолодження поверхні, що зазвичай триває близько двох-трьох років. Протягом сотень тисяч років повільні, повторювані коливання орбіти Землі навколо Сонця, які змінюють розподіл сонячної енергії, одержуваної Землею, були достатні у тому, щоб викликати цикли льодовикового періоду протягом останніх 800 000 років.

"Відбитки пальців" – це потужний спосіб вивчення причин зміни клімату. Різні впливи на клімат призводять до різних закономірностей, що спостерігаються у кліматичних записах. Це стає очевидним, коли вчені виходять за рамки змін середньої температури планети та уважніше вивчають географічні та часові закономірності зміни клімату. Наприклад, збільшення енерговіддачі Сонця призведе до зовсім іншого характеру зміни температури (на поверхні Землі та вертикально в атмосфері) порівняно зі зміною, спричиненою збільшенням концентрації CO₂. Зміни температури в атмосфері, що спостерігаються, показують відбитки пальців, набагато

Продовження..



Дізнайтесь більше про інші антропогенні причини зміни клімату:

Крім викиду парникових газів, діяльність людини також призвела до зміни енергетичного балансу Землі, наприклад:

- **Зміни у землекористуванні.** Зміни у тому, як люди використовують землю - наприклад, для лісів, ферм чи міст - можуть призводити як до потепління, так і

до локального охолоджуючого впливу шляхом зміни відбивної здатності

Поверхні Землі (впливаючи те що, скільки сонячного світла відправляється назад у космос) і змінюючи вологість регіону.

- Викиди забруднюючих речовин (крім парникових газів). Деякі промислові та сільськогосподарські процеси викидають забруднюючі речовини, які виробляють аерозолі (дрібні краплі або частинки, зважені в атмосфері). Більшість аерозолів охолоджують Землю за рахунок

відбиваючи сонячне світло назад у космос. Деякі аерозолі також впливають на формування хмар, які можуть мати ефект потепління або охолодження в залежності від їх типу та розташування. Частинки чорного вуглецю (або "сажа"), що утворюються при спалюванні вичопного палива або рослинності, зазвичай мають ефект потепління, оскільки поглинають вхідне сонячне випромінювання.

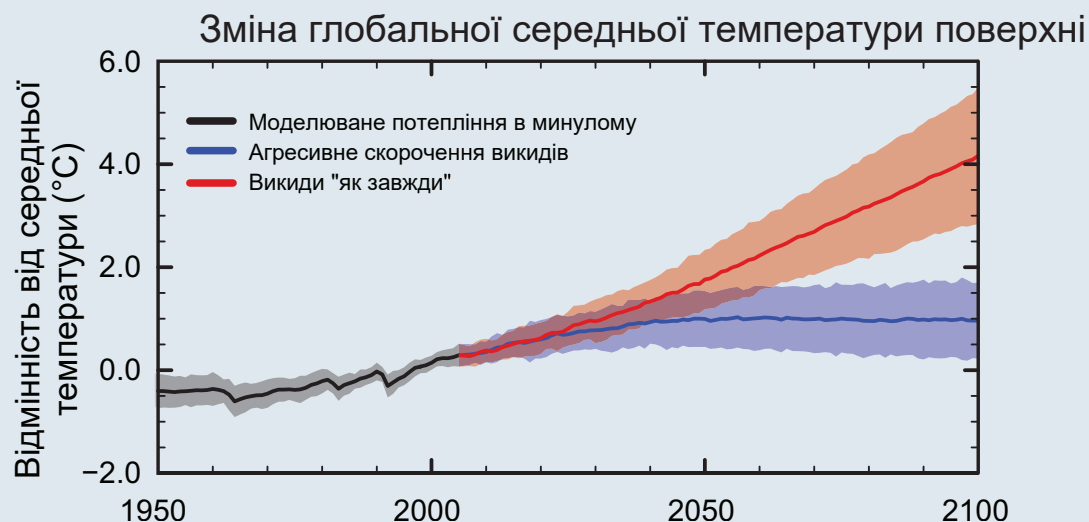


ближче до довгострокового збільшення CO₂, ніж коливань Сонця. Вчені регулярно перевіряють, чи можуть суто природні зміни Сонця, вулканічної активності чи внутрішньої мінливості клімату правдоподібно пояснити закономірності змін, що спостерігаються ними, в багатьох різних аспектах кліматичної системи. Ці аналізи показали, що зміни клімату за останні кілька десятиліть не можуть бути пояснені тільки природними факторами.

Як зміниться клімат в майбутньому?

Вчені досягли значних успіхів у спостереженнях, теорії та моделюванні кліматичної системи Землі, і ці успіхи дозволяють їм дедалі впевненіше прогнозувати майбутні зміни клімату. Тим не менш, кілька основних проблем не дозволяють дати точні оцінки того, як розвиватимуться глобальні чи регіональні температурні тенденції десятиліття за десятиліттям у майбутньому. По-перше, ми не можемо передбачити, скільки CO₂ викидатиме людська діяльність, оскільки це залежить від таких факторів, як розвиток світової економіки та зміна виробництва та споживання енергії у суспільстві у найближчі десятиліття. По-друге, при нинішньому розумінні складності функціонування кліматичного зворотного зв'язку існує низка можливих результатів навіть для певного сценарію викидів CO₂. нарешті, протягом десятиліття або навіть природна мінливість може модулювати вплив основної тенденції зміни температури. Спільно всі прогнози моделей вказують на те, що в найближчі кілька десятиліть і століть Земля продовжуватиме значно сильніше нагріватися. Якщо не відбудеться жодних технологічних чи політичних змін для зниження тенденцій викидів з їхньої нинішньої траєкторії, то в 21 столітті очікується подальше глобальне потепління на 2,6-4,8 °C (4,7-8,6 °F) на додаток до того, що вже сталося [Малюнок B5]. Прогнозування того, що ці діапазони означатимуть для клімату, що спостерігається у будь-якому конкретному місці, є складною науковою проблемою, але оцінки продовжують покращуватись у міру розвитку регіональних та локальних моделей.

Рис. B5. Величина та темпи потепління, очікувані в 21 столітті, залежать від загальної кількості парникових газів, що викидаються людством. Моделі прогнозують підвищення температури при сценарії викидів "бізнес як завжди" (червоним кольором) та при агресивному скороченні викидів, близьке до нуля через 50 років (синім кольором). Чорним кольором виділено змодельовану оцінку потепління в минулому. Кожна суцільна лінія є середнім значенням різних моделей, що використовують один і той же сценарій викидів, а заштриховані області дають уявлення про розкид (одне стандартне відхилення) між змінами температури, прогнозованими різними моделями. Усі дані відносяться до базового періоду (встановленого на нуль) 1986-2005 років. Джерело: На основі МГЕЗК AR5



11

Якщо на Землі відбувається потепління, то чому деякі зими та літа все ще дуже холодні?

Глобальне потепління - це довгострокова тенденція, але це не означає, що щороку буде тепліше попереднього. Повсякденні та щорічні зміни погодних умов продовжуватимуть призводити до надзвичайно холодних днів і ночей, зим та літ, навіть незважаючи на потепління клімату.

Зміна клімату означає не лише зміни усередненої в глобальному масштабі температури поверхні, але й зміни в атмосферній циркуляції, розмірах та закономірностях природних коливань клімату, а також у місцевій погоді. Події Ла-Нінья змінюють погодні умови таким чином, що в деяких регіонах стає волого, а вологе літо зазвичай прохолодніше. Сильніші вітри з полярних регіонів можуть сприяти тому, що іноді настає холодніша зима. Аналогічно, збереження однієї фази атмосферної циркуляції, відомої як Північноатлантичне коливання, сприяло кільком недавнім холодним зимам у Європі, східній частині Північної Америки та північній Азії.

Моделі циркуляції атмосфери та океану змінюватимуться в міру потепління Землі та впливатимуть на маршрути штормів та багато інших аспектів погоди. Глобальне потепління схиляє шанси на користь збільшення кількості теплих днів та сезонів та зменшення кількості холодних днів та сезонів. Наприклад, у 1960-х роках на континентальній частині США щодня реєструвалося більше рекордно низьких температур, ніж рекордно високих, а у 2000-х роках рекордно високих температур стало вдвічі більше, ніж рекордно низьких. Іншим важливим прикладом переваги є те, що останні десятиліття в більшості регіонів Європи, Азії, Південної Америки та Австралії почастішали теплові хвилі. Морські теплові хвилі також



12

Чому арктичний морський лід зменшується, тоді як антарктичний морський лід змінився незначно?

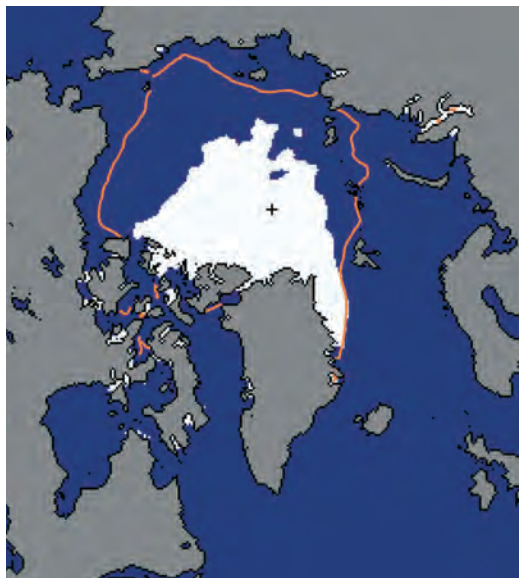
На площу морського льоду впливають вітри та океанічні течії, а також температура. Морський лід у частково закритому Північному Льодовитому океані, мабуть, безпосередньо реагує на потепління, тоді як зміни вітрів та океанічних течій, мабуть, домінують у закономірностях зміни клімату та морського льоду в океані навколо Антарктиди.

Деякі відмінності в сезонній протяжності морського льоду між Арктикою та Антарктикою обумовлені базовою географією та її впливом на атмосферну та океанічну циркуляцію. Арктика - це океанічний басейн, оточений переважно гірськими континентальними масивами суші, а Антарктида - це континент, оточений океаном. В Арктиці протяжність морського льоду обмежена навколишніми масивами суші. У Південному океані взимку морський лід може вільно поширюватися в навколишній океан, а його південний кордон визначається береговою лінією Антарктиди. Оскільки антарктична морська крига утворюється на широтах, розташованих далі від Південного полюсу (і ближче до екватора), менше льоду зберігається влітку. Площа морського льоду обох полюсів змінюється сезонно; однак довгострокові коливання літньої та зимової площі льоду в кожній півкулі різні, що частково пояснюється цими основними географічними відмінностями.

Морський лід в Арктиці різко скоротився з кінця 1970-х років, особливо влітку та восени. З початку супутникової реєстрації 1978 року щорічний мінімум площі арктичного морського льоду (що у вересні) скоротився приблизно на 40% [Малюнок 5]. Кожної арктичної зими крижаний покрив знову збільшується, але лід вже тонший, ніж раніше. Оцінки площі морського льоду в минулому дозволяють припустити, що таке скорочення може бути безпрецедентним принаймні за останні 1450 років. Оскільки морський лід має високу відбивну здатність, потепління посилюється в міру зменшення льоду та поглинання сонячного світла темнішою поверхнею океану.

Морський лід в Антарктиці показав невелике збільшення загальної довжини з 1979 по 2014 рік, хоча в деяких районах, наприклад, на захід від Антарктичного півострова відбулося скорочення. Короткострокові тенденції в

Малюнок 5. Літо в Арктиці (Виміряна у вересні) була рекордно низькою, показана (білим кольором) у порівнянні з середньою літньою площею морського льоду за період з 1979 по 2000 рік (помаранчевий контур). 2013 року площа літнього морського льоду в Арктиці децю відновилася, але все ще залишалася шостою за величиною за всю історію спостережень. У 2019 році площа морського льоду фактично зрівнялася з другим найнижчим мінімумом за всю історію супутникових спостережень, поряд з 2007 та 2016 роками, поступаючись лише 2012 року, який все ще є рекордним мінімумом. Всі 13 найнижчих значень льодовитості за всю супутникову еру сталися за останні 13 років. Джерело: Національний центр даних про сніг та лід



у Південному океані, подібні до спостережуваних, цілком можуть відбуватися в результаті природної мінливості системи атмосфери, океану та морського льоду. Зміни у структурі поверхневого вітру навколо континенту сприяли зміні антарктичної моделі морського льоду; океанічні чинники, такі як приплив холодної прісної води від крижаних шельфів, що тануть, 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, і залишаючись низькою у наступні два роки.

13

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

Нижні шари атмосфери Землі стають теплішими та вологішими внаслідок антропогенних викидів парникових газів. Це дає можливість отримати більше енергії для штормів та деяких екстремальних погодних явищ. Відповідно до теоретичних очікувань, типи явищ, найбільш тісно пов'язані з температурою, такі як теплові хвилі та екстремально спекотні дні, стають більш ймовірними. Зливи та снігопади (які підвищують ризик повеней) загалом також стають частішими.

У міру потепління клімату Землі в усьому світі спостерігаються більш часті та інтенсивніші погодні явища. Вчені зазвичай визначають ці погодні явища як "екстремальні", якщо вони не схожі на 90% або 95% аналогічних погодних явищ, що відбувалися раніше у тому ж регіоні. На кожне окреме екстремальне погодні явище впливають багато факторів, включаючи закономірності природної мінливості клімату, такі як Ель-Ніньо та Ла-Нінья, що ускладнює віднесення будь-якого конкретного екстремального явища до антропогенної зміни клімату. Однак дослідження можуть показати, чи потепління клімату зробило більш суворим ту чи іншу подію або підвищило ймовірність її виникнення.

Потепління клімату може сприяти збільшенню інтенсивності теплових хвиль за рахунок підвищення ймовірності дуже спекотних днів та ночей. Потепління клімату також збільшує випаровування на суші, що може посилити посуху та створити умови, сприятливі для лісових пожеж, а також подовжити сезон лісових пожеж. Потепління атмосфери також пов'язане з сильнішими опадами (дощами та завірюхами) через збільшення здатності повітря утримувати вологу. Події Ель-Ніньо сприяють посусі у багатьох тропічних і субтропічних районах, тоді як події Ла-Нінья сприяють більш вологим умовам у багатьох місцях. Очікується, що ці короткострокові та регіональні коливання стануть більш екстремальними за умов потепління клімату.

Тепліша і вологіша атмосфера Землі і тепліші океани роблять ймовірним, що найсильніші урагани будуть більш інтенсивними, принесуть більше опадів, торкнуться нових територій і, можливо, будуть більшими і довгоживучими. Це підтверджується наявними даними спостережень у Північній Атлантиці. Крім того, підвищення рівня моря (див. питання 14) збільшує кількість морської води, яка виштовхується на берег під час прибережних штормів, що поряд з великою кількістю опадів, викликаних штормами, може призвести до більш руйнівних штормових нагонів та повеней. Хоча глобальне потепління, ймовірно, робить урагани інтенсивнішими, зміна кількості ураганів на рік дуже невизначена. Це залишається предметом незмінних досліджень.

Очікується, що деякі умови, сприятливі для сильних гроз, що породжують торнадо, збільшуватимуться з потеплінням, проте існує невизначеність щодо інших факторів, що впливають на утворення торнадо, таких як зміни у вертикальних та горизонтальних коливаннях вітрів.



14

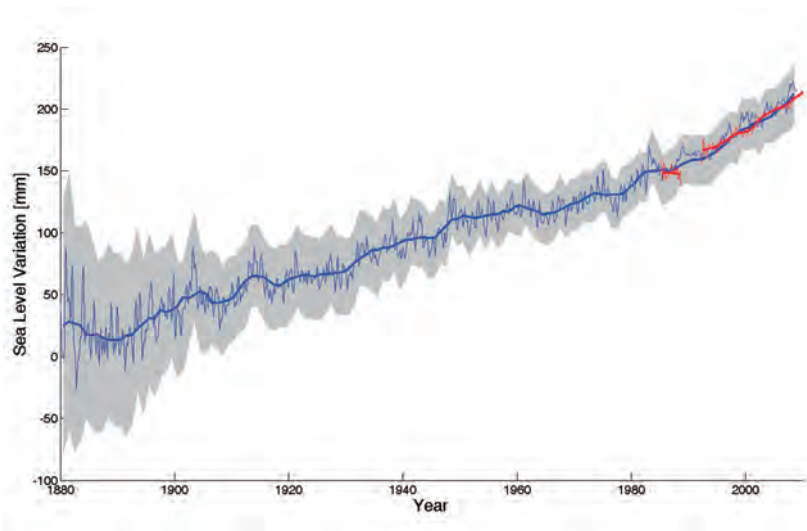
Як швидко підвищується рівень моря?

Багаторічні виміри мареографів та останні супутникові дані показують, що рівень світового океану підвищується, причому найкраща оцінка швидкості середнього глобального підвищення за останнє десятиліття становить 3,6 мм на рік (0,14 дюймів на рік). Швидкість підвищення рівня моря збільшилася з того часу, як у 1992 році почалися вимірювання за допомогою альтиметрії з космосу; домінуючим фактором підвищення середнього глобального рівня моря з 1970 року є антропогенне потепління. Загальний підйом з 1902 року становить близько 16 см (6 дюймів) [Малюнок 6].

Це підвищення рівня моря викликане збільшенням обсягу води в міру нагрівання океану, таненням гірських льодовиків у всіх регіонах світу та втратою маси Гренландського та Антарктичного крижаних щитів. Все це є наслідок потепління клімату. Коливання рівня моря також відбуваються через зміну кількості води, що зберігається на суші. Величина зміни рівня моря в тому чи іншому місці також залежить від ряду інших факторів, у тому числі від того, чи викликають регіональні геологічні процеси та підйом суші, обтяженої попередніми льодовиковими щитами, підйом чи опускання самої суші, а також від того, чи наганяють зміни вітрів і течій океанську воду на деякі узбережжя або відводять її убік.

Наслідки підвищення рівня моря найбільш гостро відчуваються у збільшенні частоти та інтенсивності періодичних штормових нагонів. Якщо CO₂ та інші парникові гази продовжать зростати за нинішньою траєкторією, то, згідно з прогнозами, рівень моря може піднятися, як мінімум, ще на 0,4-0,8 м (1,3-2,6 фута) до 2100 року, хоча у майбутньому танення крижаних щитів може значно збільшити ці значення. Більше того, підвищення рівня моря не зупиниться 2100 року; рівень моря буде набагато вищим у наступні століття, оскільки море продовжує забирати тепло, а льодовики продовжують відступати. Поки важко передбачити, як Гренландський і Антарктичний крижані щити відреагують на потепління, що триває, але передбачається, що Гренландія і, можливо, Західна Антарктида продовжуватимуть втрачати масу, в той час як більш холодні частини Антарктиди можуть набирати масу, оскільки там випадає більше снігу з більш теплого повітря, що містить більше вологи. Рівень моря в останній міжльодовиковий (теплий) період близько 125 000 років тому досяг свого піку, ймовірно, на 5-10 м вище за сучасний рівень. У цей період у полярних регіонах було тепліше, ніж сьогодні. Це дозволяє припустити, що протягом тисячоліть тривалі періоди підвищеного тепла призведуть до дуже значної втрати частини Гренландського та Антарктичного крижаних щитів та подальшого підвищення рівня моря.

Малюнок 6. Спостереження показують, що середній глобальний рівень моря піднявся приблизно на 16 см (6 дюймів) з кінця XIX століття. Останнє десятиліття рівень моря підвищується швидше; вимірювання за допомогою мареографів (синій) та супутників (червоний) показують, що найкраща оцінка середнього підвищення рівня моря за останнє десятиліття становить 3,6 мм на рік (0,14 дюйма на рік). Заштрихована область є невизначеністю рівня моря, яка зменшується в міру того, як збільшується кількість мареографів, що використовуються при розрахунку глобальних середніх значень, і кількість точок даних. Джерело: Shum and Kuo (2011)



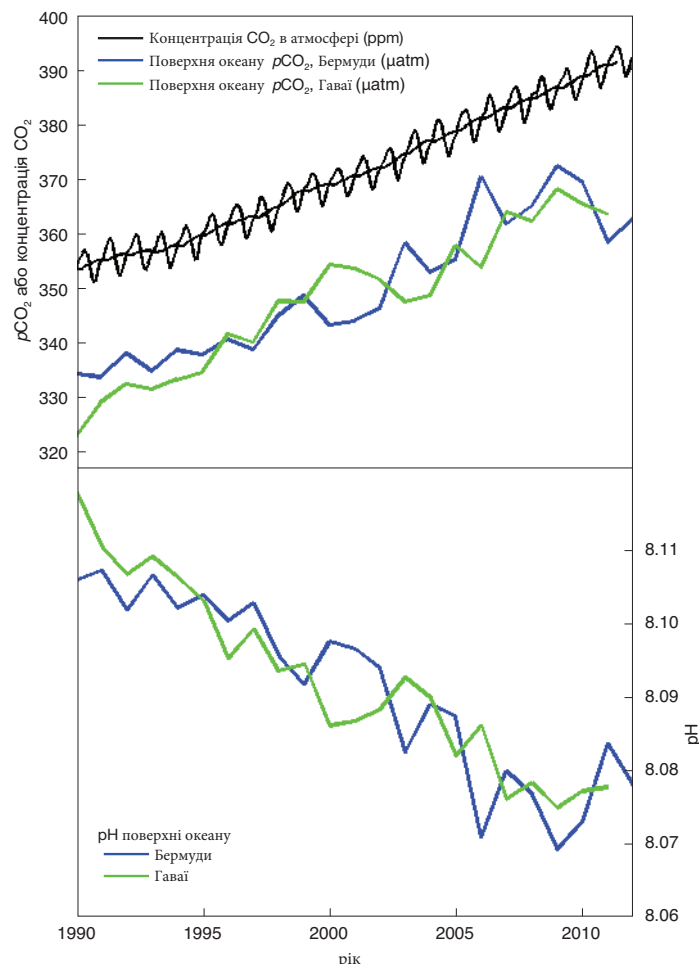
15

Що таке закислення океану та чому воно має значення?

Прямі спостереження за хімічним складом океану показали, що хімічний баланс морської води змістився у бік більш кислотного стану (нижчий рівень pH) [Малюнок 7]. Деякі морські організми (наприклад, корали та деякі молюски) мають раковини, що складаються з карбонату кальцію, який легше розчиняється у кислоті. У міру підвищення кислотності морської води цим організмам стає все важче формувати чи підтримувати свої раковини.

CO₂ розчиняється у воді, утворюючи слабку кислоту, і океани поглинули близько третини CO₂ в результаті діяльності людини, що призвело до сталого зниження рівня pH океану. Зі збільшенням вмісту CO₂ в атмосфері цей хімічний баланс ще більше зміниться протягом наступного століття. Лабораторні та інші експерименти показують, що при високому рівні CO₂ і в кисліших водах у деяких видів морських організмів змінюється форма раковин і знижується швидкість росту, хоча цей ефект відрізняється у різних видів. Підкислення також змінює кругообіг поживних речовин та багатьох інших елементів та сполук в океані і, ймовірно, призведе до зміни конкурентних переваг між видами, що надасть поки що не певний вплив на морські екосистеми та харчову мережу.

Малюнок. 7. Зі збільшенням вмісту CO₂ у повітрі збільшився вміст CO₂ у поверхневому шарі океану (верхній квадрат) та зменшився pH морської води (нижній квадрат). Джерело: адаптовано із Dore et al. (2009) та Bates et al. (2012).



16

Наскільки вчені впевнені, що протягом найближчого століття Земля ще більше потеплішає?

Дуже упевнені. Якщо викиди збережуться на нинішній траєкторії, без технологічного чи нормативного зниження, то протягом 21 століття очікується потепління на 2,6-4,8 °C (4,7-8,6 °F) на додаток до того, що сталося [Малюнок 8] .

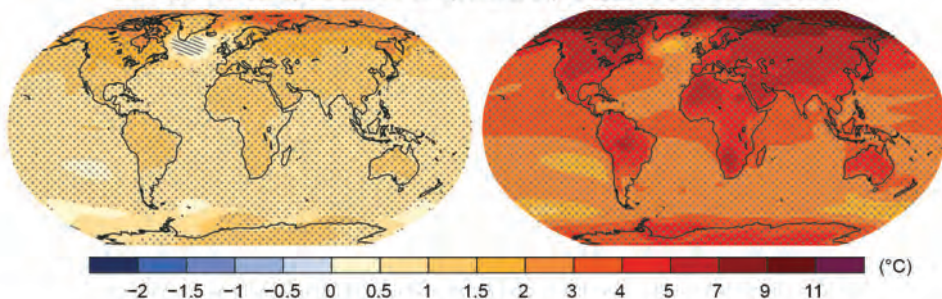
Потепління через додавання в атмосферу великої кількості парникових газів можна зрозуміти з точки зору основних властивостей парникових газів. Це, своєю чергою, призведе до численних змін у природних кліматичних процесах, чистим ефектом яких буде посилення потепління. Величина потепління, яке відбудеться, значною мірою залежить від кількості парникових газів, що накопичуються в атмосфері, і, отже, від траєкторії викидів. Якщо загальний обсяг викидів з 1875 року не перевищить 900 гігатонн (900 мільярдів тонн) вуглецю, існує дві третини шансів утримати зростання середньої глобальної температури з доіндустріального періоду нижче 2 °C (3,6 °F). Проте дві третини цієї кількості вже викинуто до атмосфери. Мета утримати зростання середньої глобальної температури на рівні менше 1,5 °C (2,7 °F) дозволила б скоротити сумарні викиди з 1875 ще менше.

Виходячи лише з встановленої фізики кількості тепла, що поглинається та виділяється CO₂, подвоєння концентрації CO₂ в атмосфері порівняно з доіндустріальним рівнем (приблизно до 560 ppm) само по собі, без посилення іншими ефектами, спричинить підвищення середньої глобальної температури приблизно на 1 °C (1,8 °F). Однак загальний обсяг потепління від даної кількості викидів залежить від ланцюжка ефектів (зворотних зв'язків), які можуть окремо посилювати або послаблювати початкове потепління.

Найбільш важливий аспект який посилює зворотний зв'язок викликана водяною парою, яка є потужним парниковим газом. У міру збільшення CO₂ та нагрівання атмосфери, тепліше повітря може утримувати більше вологи та затримувати більше тепла у нижніх шарах атмосфери. Крім того, у міру танення арктичного морського льоду та льодовиків, більше сонячного світла поглинається у більш темних поверхнях суші та океану, викликаючи подальше потепління та подальше танення льоду та снігу. Найбільша невизначеність у нашому розумінні зворотного зв'язку пов'язана з хмарами (які можуть мати як позитивний, так і негативний зворотний зв'язок), а також з тим, як зміняться властивості хмар у відповідь на зміну клімату.

Малюнок 8. Якщо викиди збережуться на нинішній траєкторії, без технологічного чи нормативного скорочення, то, за найкращими оцінками, середня глобальна температура потеплішає ще на 2,6-4,8 °C (4,7-8,6 °F) до кінця століття (праворуч). Прогнозується, що на суші потеплішає більше, ніж в океані, і, отже, більше, ніж у середньому у світі. На малюнку зліва показано прогнозоване потепління при дуже агресивному скороченні викидів. Цифри є оцінками середніх температур для 2081-2100 років, отримані за допомогою декількох моделей в порівнянні з 1986-2005. Джерело: MGEIK AR5

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



Інші важливі зворотні зв'язки пов'язані з вуглецевим циклом. В даний час суша та океани разом поглинають близько половини CO₂, викинутого в результаті діяльності людини, але очікується, що здатність суші та океану накопичувати додатковий вуглець буде зменшуватися при подальшому потеплінні, що призведе до більшого збільшення вмісту CO₂ в атмосфері та більш швидкого потепління. Моделі розрізняються у своїх прогнозах щодо того, якого додаткового потепління слід очікувати, але всі такі моделі погоджуються з тим, що загальний чистий ефект зворотного зв'язку полягає у посиленні потепління.

17

Чи є зміни клімату на кілька градусів приводом для занепокоєння?

Так. Хоча підвищення середньої глобальної температури на кілька градусів видається незначним, середня глобальна температура під час останнього льодовикового періоду була лише на 4-5 °C (7-9 °F) холоднішою, ніж зараз. Глобальне потепління всього на кілька градусів буде пов'язане з поширеними змінами регіональної та місцевої температури та опадів, а також зі збільшенням деяких типів екстремальних погодних явищ. Ці та інші зміни (такі як підвищення рівня моря та штормові нагони) вплинуть на людське суспільство і світ природи.

Як теорія, так і прямі спостереження підтвердили, що глобальне потепління пов'язане з більшим потеплінням над сушею, ніж над океанами, зволоженням атмосфери, змінами в регіональній структурі опадів, збільшенням кількості екстремальних погодних явищ, закисленням океану, таненням льодовиків та підвищенням рівня моря (що збільшує ризик затоплення берегів та штормових нагонів). Вже зараз рекордно високі температури в середньому значно випереджають рекордно низькі температури, вологі райони стають більш вологими, тоді як сухі райони стають більш сухими, сильні зливи стають сильнішими, а снігові запаси (важливе джерело прісної води для багатьох регіонів) зменшуються.

Очікується, що ці наслідки посилюватимуться в міру потепління та загрожуватимуть виробництву продовольства, запасам прісної води, прибережній інфраструктурі та особливо добробуту величезного населення, яке нині мешкає в низьколежачих районах. Навіть якщо деякі регіони можуть отримати певну локальну вигоду від потепління, довгострокові наслідки загалом будуть руйнівними.

Занепокоєння викликає не лише підвищення середньої глобальної температури на кілька градусів – важливими є також темпи цього потепління (див. питання 6). Швидкі зміни клімату, викликані діяльністю людини, означають, що залишається менше часу для вжиття заходів щодо адаптації або для адаптації екосистем, що створює великі ризики в районах, вразливих до більш інтенсивних екстремальних погодних явищ та підвищення рівня моря.

18

Що роблять вчені для усунення основних невизначеностей у розумінні кліматичної системи?

Наука - це безперервний процес спостереження, розуміння, моделювання, тестування та прогнозування. Передбачення довгострокової тенденції глобального потепління внаслідок збільшення викидів парникових газів є надійним та підтверджується все більшою кількістю фактів. Проте розуміння деяких аспектів зміни клімату залишається неповним. Як приклад можна навести природні коливання клімату на тимчасових шкалах від десятиліття до століття і в регіональних та місцевих просторових масштабах, а також реакцію хмар на зміну клімату, що є сферою активних досліджень.

продовження далі

Чому комп'ютерні моделі використовують для вивчення зміни клімату?

Майбутня еволюція клімату Землі у відповідь на нинішні швидкі темпи збільшення вмісту CO₂ в атмосфері не має точних аналогів у минулому і не може бути правильно зрозуміла за допомогою лабораторних експериментів. Оскільки ми також не можемо проводити цілеспрямовані контрольовані експерименти на самій Землі, комп'ютерні моделі є одним з найважливіших інструментів для вивчення кліматичної системи Землі.

Кліматичні моделі ґрунтуються на математичних рівняннях, що відображають найкраще розуміння основних законів фізики, хімії та біології, що визначають поведінку атмосфери, океану, поверхні суші, льоду та інших частин кліматичної системи, а також взаємодію між ними. Найбільш повні кліматичні моделі, моделі систем Землі, призначені для моделювання кліматичної системи Землі з тим ступенем деталізації, який дозволяє наше розуміння та доступні суперкомп'ютери.

Можливості кліматичних моделей неухильно покращувалися з 1960-х років. Використовуючи рівняння, засновані на фізиці, моделі можуть бути перевірені та успішно імітують широкий спектр погодних та кліматичних змін, наприклад, окремі шторми, меандри струменевих течій, події Ель-Ніньо та клімат останнього століття. Їхні прогнози найбільш помітних характеристик довгострокового сигналу антропогенної зміни клімату залишаються надійними, оскільки покоління все більш складних моделей дають багатші деталі змін. Вони також

використовуються для проведення експериментів з

виділення конкретних причин змін клімату та вивчення наслідків різних сценаріїв майбутніх викидів парникових газів та інших впливів на клімат.



Порівняння прогнозів моделей зі спостереженнями дозволяє визначити, що добре вивчено, і в той же час виявити невизначеність чи прогалину в нашому розумінні. Це допомагає визначити пріоритети нових досліджень. Тому пильний моніторинг усієї кліматичної системи – атмосфери, океанів, суші та льоду – вкрай важливий, оскільки кліматична система може бути сповнена сюрпризів.

Спільно польові та лабораторні дані та теоретичне розуміння використовуються для розвитку моделей кліматичної системи Землі та покращення представлення ключових процесів у них, особливо тих, які пов'язані з хмарами, аерозолями та перенесенням тепла в океани. Це дуже важливо для точного моделювання зміни клімату та пов'язаних з ним змін у суворій погоді, особливо в регіональних та місцевих масштабах, важливих для ухвалення політичних рішень.

Моделювання того, як хмари будуть змінюватися з потеплінням і, у свою чергу, можуть впливати на потепління, залишається одним з основних завдань для глобальних кліматичних моделей, частково тому, що різні типи хмар по-різному впливають на клімат, а багато хмарних процесів відбуваються в масштабах менших, ніж можуть дозволити більшість існуючих моделей. Збільшення потужності комп'ютерів дозволяє дозволити деякі з цих процесів у моделях нового покоління.

Десятки груп та дослідницьких інститутів працюють над кліматичними моделями, і вчені тепер можуть аналізувати результати практично всіх основних світових моделей систем Землі та порівнювати їх один з одним та з даними спостережень. Такі можливості приносять величезну користь у виявленні сильних та слабких сторін різних моделей та діагностиці причин відмінностей між моделями, що дозволяє зосередити дослідження на відповідних процесах. різницю між моделями дозволяють оцінити невизначеність прогнозів майбутнього на рахунок змін в кліматі. Крім того, великі архіви результатів різних моделей допомагають вченим виявити ті аспекти прогнозів зміни клімату, які є надійними та можуть бути інтерпретовані з погляду відомих фізичних механізмів.

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

19

Чи є сценарії катастроф про переломні точки, такі як "відключення Гольфстріму" і викид метану з Арктики, приводом для занепокоєння?

Результати найкращих з існуючих кліматичних моделей не передбачають різкої зміни (або колапсу) Атлантичної меридіональної поворотної циркуляції, яка включає Гольфстрім, у найближчому майбутньому. Однак це й інші потенційно небезпечні різкі зміни, такі як викид метану та вуглекислого газу внаслідок танення вічної мерзлоти залишаються активними областями наукових досліджень. Деякі різкі зміни вже відбуваються, наприклад, зменшення площі арктичного морського льоду (див. питання 12), і в міру посилення потепління не можна виключати можливість інших великих різких змін.

Склад атмосфери змінюється у бік умов, які не спостерігалися протягом мільйонів років, тому ми рухаємося невідомою територією, і невизначеність велика. Кліматична система включає безліч конкуруючих процесів, які можуть перевести клімат в інший стан після перевищення порогового значення.

Добре відомим прикладом є переливна циркуляція океану з півдня на північ, яка підтримується холодною солоною водою, що опускається в Північній Атлантиці, і включає перенесення додаткового тепла в Північну Атлантику через Гольфстрім. Під час останнього льодовикового періоду приплив прісної води з крижаного щита, що тоне, над Північною Америкою призвів до уповільнення цієї циркуляції. Це, своєю чергою, викликало широкомасштабні зміни клімату у Північній півкулі. Однак освіження Північної Атлантики внаслідок танення Гренландського крижаного щита відбувається поступово, і тому не очікується, що воно спричинить різкі зміни.

Ще одна проблема пов'язана з Арктикою, де значне потепління може дестабілізувати метан (парниковий газ), замкнений в океанічних відкладах та вічній мерзлоті, що потенційно може призвести до швидкого вивільнення великої кількості метану. Якщо відбудеться такий швидкий викид, то будуть серйозні і швидкі зміни клімату. Такі ризиковані зміни вважаються малоймовірними у цьому столітті, але їх за визначенням важко передбачити. Тому вчені продовжують вивчати можливість перевищення таких переломних точок, за якими нам загрожують великі та різкі зміни.

Крім різких змін у самій кліматичній системі, стійка зміна клімату може перетнути порогові значення, що викликає різкі зміни в інших системах. Наприклад, у людських системах інфраструктура зазвичай створюється з урахуванням мінливості клімату на час будівництва. Поступові зміни клімату можуть викликати різкі зміни у корисності інфраструктури - наприклад, коли підвищення рівня моря раптово перевищує рівень морських валів, або коли танення вічної мерзлоти викликає раптове руйнування трубопроводів, будівель чи доріг. У природних системах при підвищенні температури повітря та води деякі види, такі як гірська пищуха та багато океанічних коралів, більше не зможуть виживати у своїх нинішніх місцях проживання і будуть змушені переселитися (якщо це можливо) або швидко адаптуватися. Інші види можуть краще почуватися в нових умовах, викликаючи різкі зміни в балансі екосистем; наприклад, більші температури дозволили більшій кількості короїдів пережити зиму в деяких регіонах, де спалахи жуків знищили ліси.



20

Якщо припинити викиди парникових газів, чи клімат повернеться до умов 200-річної давності?

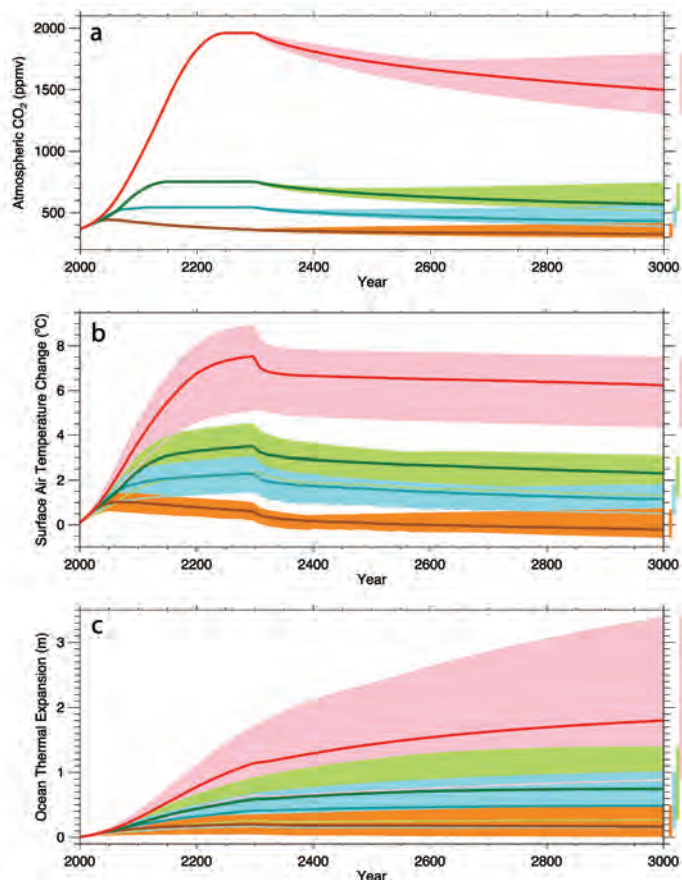
Ні. Навіть якби викиди парникових газів раптово припинилися, температури поверхні Землі знадобилися б тисячі років, щоб охолонути і повернутися до рівня доіндустріальної доби.

Якби викиди CO₂ припинилися повністю, знадобилося б багато тисяч років, щоб атмосферний CO₂ повернувся до "доіндустріального" рівня через його дуже повільне переміщення в глибокий океан і остаточне поховання в океанічних відкладеннях. Поверхневі температури залишаться підвищеними принаймні протягом тисяч років, що означає довгострокову прихильність до більш теплої планети через минулі та поточні викиди. Рівень моря, ймовірно, продовжить підвищуватись протягом багатьох століть навіть після припинення зростання температури [Малюнок 9]. Потрібне значне похолодання, щоб звернути назад танення льодовиків та Гренландського крижаного щита, які утворилися під час минулого холодного клімату. Тому поточне потепління Землі, спричинене CO₂, по суті є незворотним у масштабах людства. Обсяг та швидкість подальшого потепління майже повністю залежатимуть від того, скільки ще CO₂ викине людство.

Сценарії майбутньої зміни клімату все частіше передбачають використання технологій, здатних вилучити з атмосфери парникові гази. У таких сценаріях "негативних викидів" передбачається, що в якийсь момент

в майбутньому будуть зроблені широкомасштабні зусилля, які використовуватимуть такі технології для видалення CO₂ з атмосфери та зниження його концентрації в атмосфері, тим самим починаючи звертати назад викликане CO₂ потепління на триваліших часових інтервалах. Розгортання таких технологій у широких масштабах вимагатиме значного зниження їхньої вартості. Навіть якби такі технологічні рішення були практично здійсненні, суттєве скорочення викидів CO₂ все одно було б необхідним.

Малюнок 9. Якби глобальні викиди раптово припинилися, то знадобилося б багато часу, щоб температура повітря біля поверхні і океану почала охолоджуватися, оскільки надлишок CO₂ в атмосфері залишиться там надовго і продовжуватиме ефект потепління. Модельні прогнози показують, як концентрація CO₂ в атмосфері (a), температура повітря біля поверхні (b) та теплове розширення океану (c) відповідно до сценарію припинення викидів у 2300 році (червоний), сценарію агресивного скорочення викидів, близького до нуля через 50 років (помаранчевий), та двох проміжних сценаріїв викидів (зелений та синій). Невелике зниження температури у 2300 році викликано усуненням викидів короткоживучих парникових газів, включаючи метан. Джерело: Zickfeld et al., 2013



У цьому документі пояснюється, що є добре вивчені фізичні механізми, за допомогою яких зміни у кількості парникових газів викликають зміни клімату. У ньому розглядаються докази того, що концентрація цих газів в атмосфері збільшилася і продовжує швидко зростати, що відбувається зміна клімату, і що більшість недавніх змін майже напевно викликана викидами парникових газів, викликаними діяльністю людини. Подальша зміна клімату неминуха; якщо викиди парникових газів не припиняться, майбутні зміни значно перевищать ті, що відбулися досі. Оцінки масштабів та регіонального вираження майбутніх змін залишаються різними, проте очікується збільшення екстремальних кліматичних явищ, які можуть негативно вплинути на природні екосистеми, діяльність людини та інфраструктуру.

Громадяни та уряди можуть вибрати один із кількох варіантів (або суміш цих варіантів) у відповідь на цю інформацію: вони можуть змінити свою модель виробництва та використання енергії, щоб обмежити викиди парникових газів і, отже, масштаби змін клімату; вони можуть чекати змін та прийняти втрати, збитки та страждання, що виникають; вони можуть адаптуватися до фактичних та очікуваних змін настільки, наскільки це можливо; або вони можуть шукати поки що недоведені "геоінженерні" рішення для протидії деяким змінам клімату, які в іншому випадку відбудуться. Кожен з цих варіантів має свої ризики, привабливі сторони та витрати, і те, що буде зроблено насправді, може бути сумішшю цих різних варіантів. Різні країни та спільноти відрізнятимуться за ступенем уразливості та здатності до адаптації. Необхідно провести важливі дебати щодо вибору між цими варіантами, щоб вирішити, що краще для кожної групи чи нації, і, найголовніше, для населення планети загалом. Варіанти повинні обговорюватися в глобальному масштабі, оскільки в багатьох випадках найбільш уразливі спільноти контролюють лише незначну частину викидів, як минулих, так і майбутніх. Наш опис наукових даних про зміну клімату як фактів, так і невизначеностей пропонується як основа для проведення політичних дебатов.

Автори :

Наступні особи служили як основна група авторів для редакцій цього документа 2014 та 2020 років:

- | | |
|--|---|
| ■ Eric Wolff FRS, (Великобританія), Університет Кембріджу | ■ John Shepherd FRS, Університет Саутгемптон |
| ■ Inez Fung (NAS, Сполучені Штати Америки), Університет Каліфорнії, Берклі | ■ Keith Shine FRS, Університет Редінга |
| ■ Brian Hoskins FRS, Інститут зміни клімату Грантама | ■ Susan Solomon (NAS), Массачусетський технологічний інститут |
| ■ John F.B. Mitchell FRS, Метеорологічний офіс Великобританії | ■ Kevin Trenberth, Національний центр атмосферних досліджень |
| ■ Tim Palmer FRS, Оксфордський Університет | ■ John Walsh, Університет Аляски, Фербенкс |
| ■ Benjamin Santer (NAS), Ліверморська національна лабораторія імені Лоуренса | ■ Don Wuebbles, Університет Іллінойсу |

Підтримку персоналу для перегляду 2020 року надали: Richard Walker, Amanda Purcell, Nancy Huddleston, та Michael Hudson. Ми висловлюємо особливу подяку Rebecca Lindsey та NOAA Climate.gov за надання даних і оновлення цифр.

Рецензенти

Наступні особи виступали як рецензенти документа 2014 року відповідно до процедур, затверджених Королівським товариством та Національною академією наук:

- | | |
|--|--|
| ■ Richard Alley (NAS), Кафедра геонаук, Університет штату Пенсільванія | ■ Jerry Meehl, Старший науковий співробітник Національного центру атмосферних досліджень |
| ■ Alec Broers FRS, Колишній президент Королівської інженерної академії | ■ John Pendry FRS, Імперський коледж Лондона |
| ■ Harry Elderfield FRS, Департамент наук про Землю Кембриджського університету | ■ John Pyle FRS, Хімічний факультет Кембриджського університету |
| ■ Joanna Haigh FRS, Професор фізики атмосфери Імперського коледжу Лондона | ■ Gavin Schmidt, Центр космічних польотів NASA Goddard |
| ■ Isaac Held (NAS), NOAA Лабораторія геофізичної гідродинаміки | ■ Emily Shuckburgh, Британська антарктична служба |
| ■ John Kutzbach (NAS), Центр кліматичних досліджень Університету Вісконсіна | ■ Gabrielle Walker, Журналіст |
| | ■ Andrew Watson FRS, Університет Східної Англії |

Підтримка

Підтримку видання 2014 року надали ендаумент-фонди НАН. Ми висловлюємо щирі подяку фонду Ralph J. та Carol M. Cicerone за підтримку місії НАН у підготовці цього видання 2020 року.