The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Jak długo Ziemia może pozostać zielona? Model klimatu podaje przedziały, nie datę końca świata

Dwadzieścia dziewięć trójwymiarowych symulacji klimatu umieszcza różne granice ziemskiej biosfery fotosyntetycznej mniej więcej od 1,35 do 1,87 miliarda lat od dziś. Wartości zależą od celowo uproszczonych ścieżek wietrzenia skał, temperatury i najniższych stężeń dwutlenku węgla, jakie mogłyby wykorzystywać rośliny. Nie przewidują końca wszystkich roślin, całego życia, cywilizacji ani planety.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

Jak długo Ziemia może pozostać zielona? Model klimatu podaje przedziały, nie datę końca świata

Liść istnieje dzięki kruchemu kompromisowi. Potrzebuje światła, wody, dwutlenku węgla i temperatury, którą jego chemia jest w stanie znieść. W skali ludzkiego życia Słońce wydaje się stałym elementem tego układu. W skali miliarda lat już nim nie jest.

W miarę starzenia się na ciągu głównym Słońce powoli staje się jaśniejsze. Więcej światła słonecznego ogrzewa Ziemię, ale planeta reaguje w długiej skali czasu: reakcje między wodą deszczową, dwutlenkiem węgla i skałami krzemianowymi mogą usuwać dwutlenek węgla z atmosfery. Osłabia to efekt cieplarniany i kompensuje część ocieplenia. Ten sam mechanizm, który chłodzi planetę, może ostatecznie pozbawić organizmy fotosyntetyzujące węgla używanego do budowy żywej tkanki.

Nowa praca w Journal of Geophysical Research: Atmospheres pyta, które ograniczenie może nadejść pierwsze: zbyt wysoka temperatura czy zbyt mało dwutlenku węgla. Odpowiedzią nie jest data śmierci Ziemi. W dwóch celowo uproszczonych ścieżkach przyszłości przyjęte granice życia fotosyntetycznego przypadają mniej więcej **od 1,35 do 1,87 miliarda lat od dziś**.

Przedział ten dotyczy **biosfery roślinnej**: tej części żywego systemu Ziemi, którą podtrzymują organizmy fotosyntetyzujące, zwłaszcza rośliny i inne formy życia przekształcające światło i dwutlenek węgla w materię biologiczną. Nie jest to prognoza dla każdego mikroorganizmu. Nie jest to długość życia ludzkiej cywilizacji. Nie jest to długość życia planety.

Planetarny termostat ma dwa niepewne ustawienia

Główną niewiadomą jest **wietrzenie krzemianów**. Dwutlenek węgla rozpuszcza się w wodzie deszczowej, reaguje ze skałami krzemianowymi i ostatecznie jest transportowany w stronę oceanów i osadów. Wulkany w geologicznej skali czasu zwracają dwutlenek węgla do atmosfery. Razem procesy te tworzą część cyklu węglanowo-krzemianowego, często opisywanego jako planetarny termostat.

W cieplejszym, wilgotniejszym świecie wietrzenie może przyspieszyć i szybciej usuwać dwutlenek węgla. Naukowcy nie wiedzą jednak, jak silnie ta reakcja będzie kontrolować Ziemię pod jaśniejszym przyszłym Słońcem. Jacob Haqq-Misra i Eric Wolf nie wybrali więc jednej rzekomo poprawnej ścieżki. Zamodelowali dwa **przypadki skrajne**: celowo ekstremalne scenariusze służące do wyznaczenia granic niepewności.

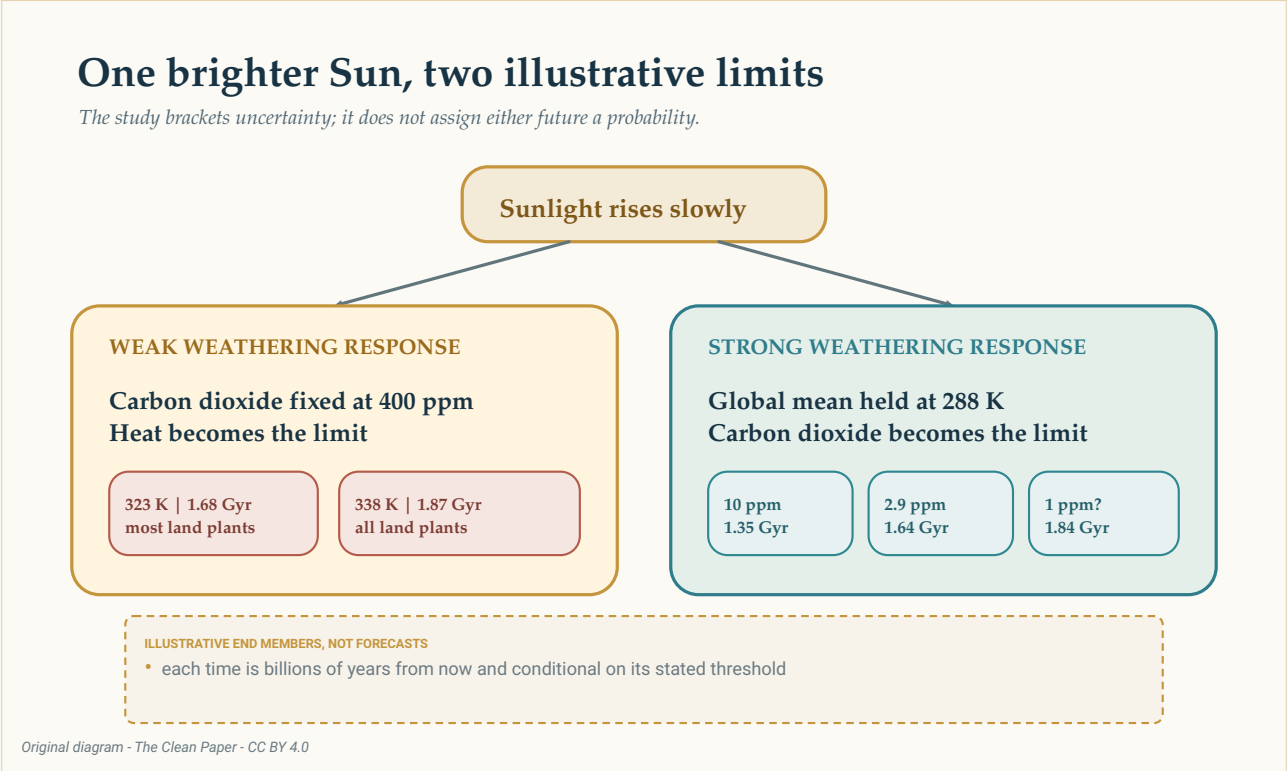
- W **przypadku słabego wietrzenia** stężenie dwutlenku węgla w atmosferze pozostaje na poziomie 400 części na milion, podczas gdy jaśniejące Słońce podnosi temperaturę.
- W **przypadku silnego wietrzenia** globalna średnia temperatura powierzchni pozostaje na poziomie 288 kelwinów, czyli około 15 stopni Celsjusza, podczas gdy wraz ze wzrostem nasłonecznienia dwutlenek węgla jest usuwany z atmosfery.

Żadna z gałęzi nie jest przedstawiona jako rzeczywista przyszłość Ziemi. Pierwsza pyta, co zrobiłoby

ciepło, gdyby poziom dwutlenku węgla pozostał wysoki. Druga pyta, co zrobiłby niedobór węgla, gdyby wietrzenie utrzymywało średnią globalną temperaturę blisko dzisiejszej.

Jak wietrzenie może działać jak termostat?

Analogia dotyczy sprzężenia zwrotnego, a nie dosłownego pokrętła. Gdy cieplejszy klimat przyspiesza wietrzenie chemiczne, większa ilość atmosferycznego dwutlenku węgla może trafić do substancji rozpuszczonych, minerałów i osadów. Usunięcie tego gazu cieplarnianego przeciwdziała części początkowego ocieplenia. W bardzo długich skalach czasu odgazowanie wulkaniczne zwraca dwutlenek węgla.
Siła każdego ogniwa zależy od opadów, odsłoniętych skał, erozji, biologii, tektoniki i chemii oceanów. Dlatego praca testuje graniczne odpowiedzi, zamiast traktować termostat jako dobrze poznaną maszynę.



Praca ujmuje niepewną przyszłość między dwoma ilustracyjnymi przypadkami skrajnymi. Jeśli wietrzenie reaguje słabo, rosnące ciepło osiąga przyjęte progi dla roślin lądowych. Jeśli reaguje silnie, spadające stężenie dwutlenku węgla osiąga przyjęte progi fotosyntezy. Są to warunkowe gałęzie modelu, nie prawdopodobieństwa ani daty odliczania.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dwadzieścia dziewięć ustalonych światów modelowych, nie jeden film trwający dwa miliardy lat

Badacze użyli ExoCAM, trójwymiarowego globalnego modelu klimatu, aby obliczyć **29 klimatów stanu ustalonego** dla różnych kombinacji silniejszego nasłonecznienia i niższego stężenia dwutlenku węgla. Każdy przypadek uruchamiano na 70 lat modelowych. Jeden rok modelowy oznacza tutaj jeden symulowany cykl roczny przy stałych warunkach: jest to czas obliczeń potrzebny, by sztuczny klimat się ustalił, a nie jeden krok w corocznej prognozie przyszłości Ziemi. Po ustabilizowaniu symulowanego klimatu uśredniono ostatnich 20 lat.

Te 29 przypadków to odrębne światy modelowe. Każde uruchomienie jest jednym punktem siatki i odpowiada na pytanie: „jaki ustalony klimat pasuje do tej wybranej pary nasłonecznienia i stężenia dwutlenku węgla?". Komputer nie rozpoczął od dzisiejszej Ziemi i nie ewoluował w sposób ciągły jej atmosfery, skał, oceanów i organizmów przez kolejne dwa miliardy lat. Autorzy prześledzili zamiast tego dwie schematyczne ścieżki wietrzenia przez wcześniej obliczone punkty; sama droga między punktami nie była symulowana.

Tabela odtwarza kombinacje nasłonecznienia i dwutlenku węgla z oficjalnego archiwum danych modelu. Identyfikatory przypadków dodano tutaj jako pomoc w czytaniu, zgodnie z kolejnością w archiwum. **S/S0** to względna stała słoneczna: energia słoneczna padająca w modelu podzielona przez jej dzisiejszą wartość S0. Wartość 1,2 oznacza zatem o 20 procent więcej energii słonecznej niż dziś. **CO2 (ppm)** oznacza udział dwutlenku węgla w atmosferze, liczony jako liczba cząsteczek na milion cząsteczek atmosfery.

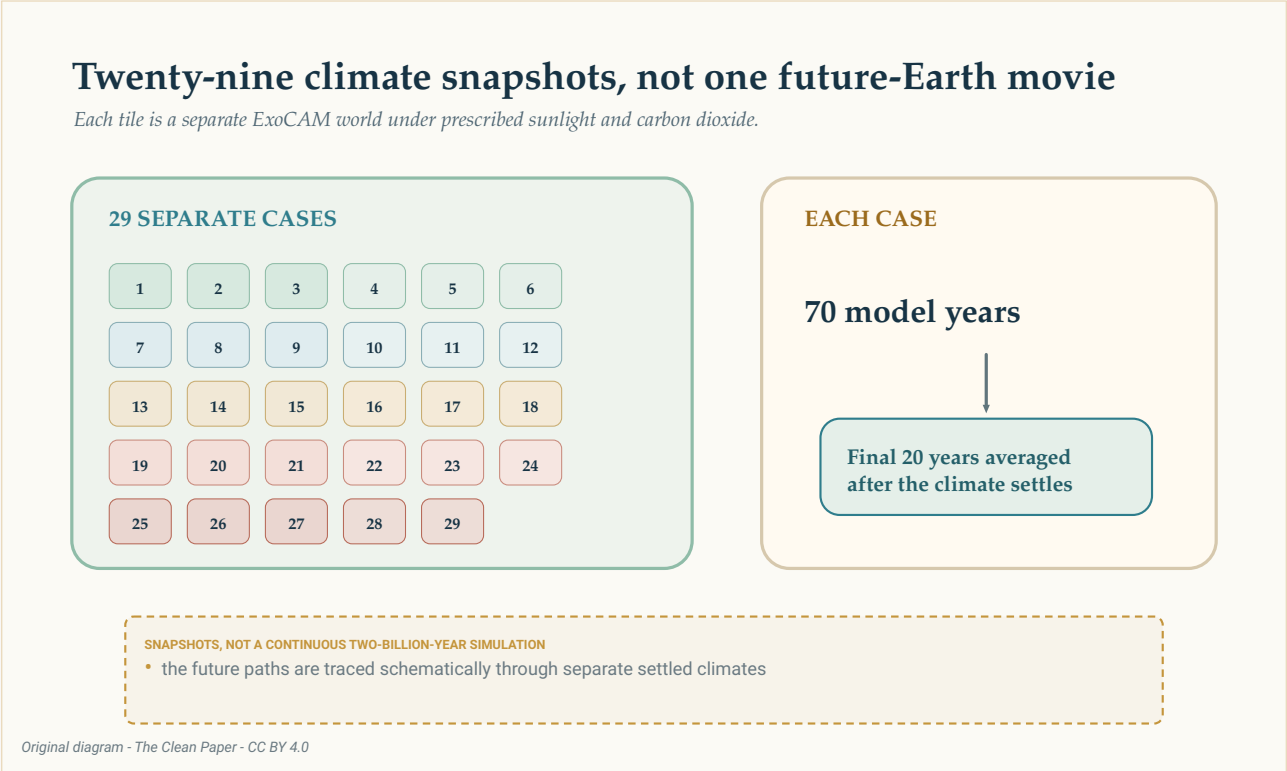
ID przypadku	S/S0	CO2 (ppm)
1	1,0	400
2	1,0	180
3	1,0	11,25
4	1,0	1,40625
5	1,044	400
6	1,044	180
7	1,044	135
8	1,044	11,25
9	1,044	1,40625
10	1,081	400
11	1,081	180
12	1,081	11,25
13	1,081	1,40625
14	1,091	400
15	1,091	180
16	1,091	34
17	1,091	11,25
18	1,091	1,40625
19	1,143	400

ID przypadku	S/S0	CO2 (ppm)
20	1,143	180
21	1,143	11,25
22	1,143	6
23	1,143	1,40625
24	1,2	400
25	1,2	180
26	1,2	11,25
27	1,2	1,40625
28	1,2	0,45
29	1,2	0

Modelowa Ziemia jest rozpoznawalna, ale celowo ograniczona. Ma rozmiar Ziemi i współczesną geografię. Zamiast w pełni cyrkulującego oceanu wykorzystuje uproszczony ocean warstwowy, ciśnienie atmosferyczne zbliżone do dzisiejszego ziemskiego — jeden bar — oraz stałe stężenie metanu. Jej orbita jest idealnie kołowa — mimośród wynosi zero — a oś obrotu nie jest nachylona — nachylenie osi również wynosi zero. Model nie zawiera jawnie gleby ani roślinności, ani sprzężenia zwrotnego zmieniającej się biosfery. Co najważniejsze, model klimatu nie jest dynamicznie sprzężony z modelem wietrzenia skał. Innymi słowy, ExoCAM nie oblicza wietrzenia, nie używa go do aktualizacji stężenia dwutlenku węgla, a następnie nie uruchamia kolejnego klimatu w pętli sprzężenia zwrotnego. Badacze narzucili zamiast tego dwie ścieżki graniczne i prześledzili je przez siatkę 29 przypadków klimatycznych.

Co oznacza „stan ustalony" w modelu klimatu?

Przypadek stanu ustalonego to modelowy klimat, któremu pozwolono się ustabilizować przy jednym wybranym Słońcu i jednej atmosferze. Pogoda w symulacji nadal zmienia się z dnia na dzień i z roku na rok, ale jej długookresowe średnie przestają wyraźnie dryfować.
Jest to użyteczne do pytania „jaki klimat pasuje do tych warunków?". To coś innego niż przewidywanie dokładnej drogi, po której rzeczywista Ziemia przechodzi od jednego zestawu warunków do następnego.



Każdy kafelek to osobne uruchomienie klimatu ExoCAM na 70 lat modelowych, z uśrednieniem ostatnich 20 lat. Badanie objęło 29 ustalonych klimatów dla narzuconych warunków nasłonecznienia i stężenia dwutlenku węgla; nie symulowało jednej, ciągle ewoluującej Ziemi przez dwa miliardy lat.

The Clean Paper CC BY 4.0

Przypadek skrajny pierwszy: dość dwutlenku węgla, za dużo ciepła

W gałęzi słabego wietrzenia stężenie dwutlenku węgla pozostaje stałe na poziomie 400 części na milion. Wraz ze wzrostem dopływu energii słonecznej czynnikiem ograniczającym staje się ciepło.

Praca wykorzystuje dwa progi globalnej średniej temperatury zaczerpnięte z wcześniejszych badań:

- Przy **323 kelwinach**, czyli około **50 stopniach Celsjusza** jako globalnej średniej rocznej, świat uznaje się za zbyt gorący dla większości roślin lądowych. Model osiąga ten próg za około **1,68 miliarda lat**.
- Przy **338 kelwinach**, czyli około **65 stopniach Celsjusza** jako globalnej średniej rocznej, świat uznaje się za zbyt gorący dla wszystkich roślin lądowych. Model osiąga ten próg za około **1,87 miliarda lat**.

Są to przyjęte granice biologiczne, a nie uniwersalne temperatury, przy których każdy organizm fotosyntetyzujący musi przestać funkcjonować. Globalna średnia ukrywa także duże różnice regionalne. Badanie osobno analizuje miejsca, w których kombinacje temperatury i wody mogłyby pozostać

odpowiednie, ale oznaczenie na mapie klimatu nie jest w stanie skatalogować każdego przyszłego refugium ani każdej adaptacji.

Przypadek skrajny drugi: znośna temperatura, za mało dwutlenku węgla

W gałęzi silnego wietrzenia globalna średnia temperatura jest utrzymywana na poziomie 288 kelwinów, około 15 stopni Celsjusza, podczas gdy stężenie dwutlenku węgla w atmosferze spada. Odpowiedź zależy tutaj od tego, jak mało węgla mogą wykorzystywać różne szlaki fotosyntetyczne.

- Przy tradycyjnym progu **10 części na milion** — dziesięciu cząsteczek dwutlenku węgla na milion cząsteczek atmosfery — granica fotosyntezy C4 przypada za około **1,35 miliarda lat**. Fotosyntezę C4 wykorzystują między innymi kukurydza i trzcina cukrowa; mechanizm ten koncentruje dwutlenek węgla wokół enzymu, który go wiąże.
- Zastosowanie alternatywnego progu **2,9 części na milion** dla C4, omawianego we wcześniejszych badaniach, przesuwa granicę do około **1,64 miliarda lat**.
- Wstępny próg **1 części na milion**, związany z możliwym przetrwaniem niektórych roślin CAM — wykorzystujących metabolizm kwasowy gruboszowatych, który oddziela pobieranie dwutlenku węgla w nocy od jego wykorzystania w dzień — albo roślin wodnych zdolnych używać rozpuszczonego wodorowęglanu, przesuwa granicę do około **1,84 miliarda lat**.

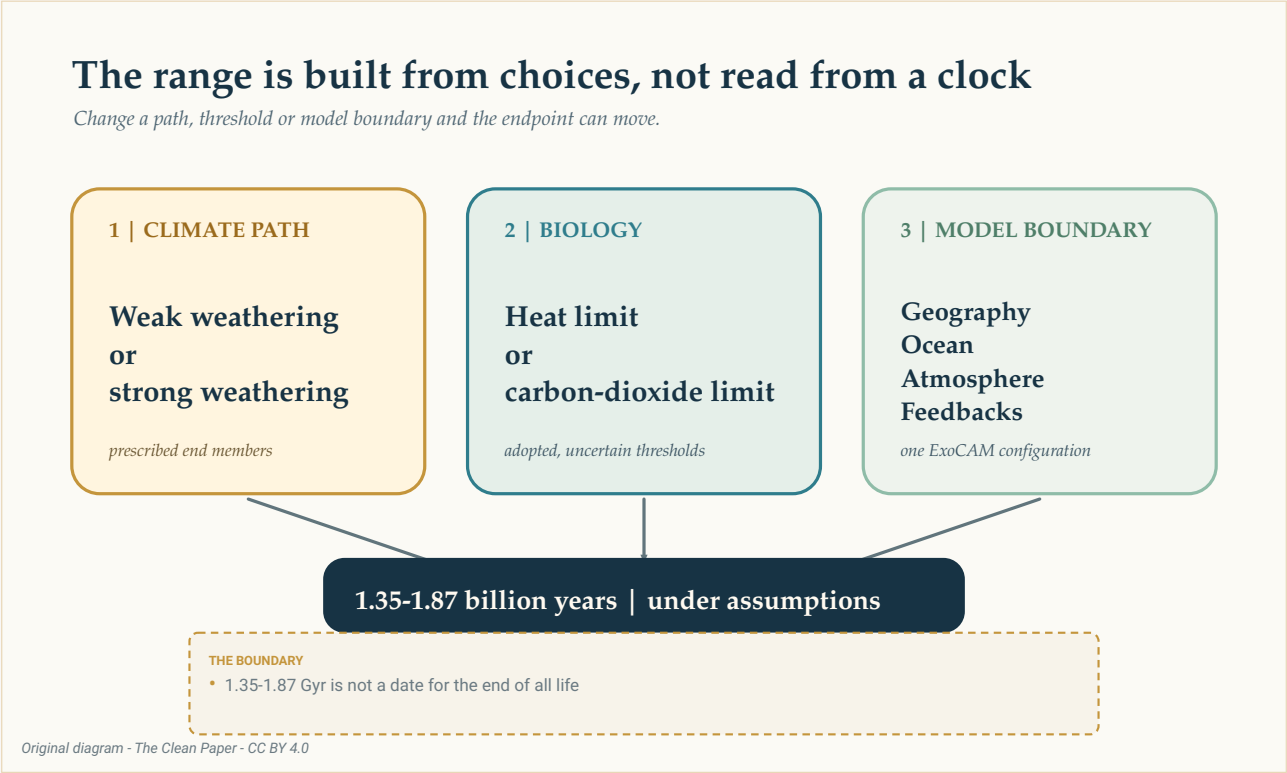
Ostatnia liczba jest obarczona największym zastrzeżeniem biologicznym. Autorzy wyraźnie określają limit jednej części na milion jako wstępny. Nie jest to eksperymentalnie ustalony próg przeżycia dla wszystkich roślin CAM ani roślinności wodnej w warunkach przyszłej Ziemi.

> **C3, C4 i CAM to strategie, nie drabina**
>
> Rośliny wykorzystują różne szlaki biochemiczne do wychwytywania węgla. **Fotosynteza C3** jest najpowszechniejsza. **Fotosynteza C4**, stosowana między innymi przez kukurydzę i trzcinę cukrową, koncentruje dwutlenek węgla wokół enzymu wiążącego węgiel i może działać lepiej przy jego niedoborze. **Metabolizm kwasowy gruboszowatych (CAM)** rozdziela pobieranie i wykorzystywanie węgla między nocą a dniem, pomagając wielu roślinom oszczędzać wodę.
> Są to rodziny strategii z wieloma różnicami między gatunkami, a nie kolejne szczeble „lepszych” roślin. Bardzo niskie progi dwutlenku węgla użyte w pracy są założeniami do badania możliwych granic, a nie gwarancją, że przyszły ekosystem wyewoluuje zdolność ich wykorzystywania.

Dlaczego 1,86 miliarda lat nie jest datą ważności

Podawane w nagłówkach oszacowanie około **1,86 miliarda lat** jest średnią dwóch optymistycznych górnych punktów końcowych: 1,84 miliarda lat w gałęzi ograniczonej dwutlenkiem węgla i 1,87 miliarda lat w gałęzi ograniczonej ciepłem. To zwięzłe podsumowanie dwóch różnych scenariuszy. Nie jest to trzeci wynik modelu o większej precyzji ani najlepsza prognozowana data.

Nawet szerszy przedział od 1,35 do 1,87 miliarda lat nie ma jednego przypisanego prawdopodobieństwa. Jego dolna i górna wartość zależą od różnych założeń dotyczących wietrzenia, różnych progów biologicznych i jednej konfiguracji modelu klimatu. Przedział mierzy wybory dokonane w eksperymencie w takim samym stopniu, jak mierzy czas.



Przedział od 1,35 do 1,87 miliarda lat pojawia się dopiero po wyborze ścieżki wietrzenia, progu biologicznego i granic modelu. Jest to mapa założeń, nie zegar odliczający do wymarcia całego życia.

The Clean Paper CC BY 4.0

Inne granice mogą nadejść wcześniej

Najdłuższe oszacowania czasu trwania biosfery roślinnej zbliżają się do osobnej i niepewnej granicy: wilgotnego lub niekontrolowanego efektu cieplarnianego, który mógłby doprowadzić do znacznej utraty oceanów. Modele klimatu bardzo się różnią co do tego, kiedy takie stany rozpoczynają się przy rosnącym nasłonecznieniu, zwłaszcza daleko od dzisiejszych warunków. Niektóre oszacowania umieszczają je przed najbardziej optymistyczną granicą fotosyntezy.

Oznacza to, że górnej gałęzi nie można czytać jako obietnicy, iż Ziemia zachowa oceany, znajome kontynenty lub zamieszkiwalne warunki powierzchniowe aż do 1,87 miliarda lat od dziś. Model nie obejmuje też przyszłej tektoniki płyt, zmian powierzchni lądów, ewoluujących ekosystemów ani w pełni dynamicznego oceanu. Obliczenia pochłaniania i emisji energii przez atmosferę są również rozciągane na reżimy intensywnego nasłonecznienia i skrajnie niskiego stężenia dwutlenku węgla, w których różne modele zaczynają się rozchodzić.

Adaptacja ewolucyjna i interwencja technologiczna pojawiają się w dyskusji pracy jako możliwości. Nie są wynikami 29 symulacji klimatu. Model nie pokazuje, że przyszłe organizmy wyewoluują szlak fotosyntetyczny działający przy jednej części na milion, ani że jakaś cywilizacja będzie zarządzać atmosferą przez miliard lat.

To nie jest wynik dotyczący dzisiejszego kryzysu klimatycznego

Jaśnienie Słońca działa przez setki milionów i miliardy lat. Współczesne ocieplenie wywołane przez człowieka wynika z szybkiego wzrostu stężenia gazów cieplarnianych w ciągu dekad i stuleci. Są to różne wymuszenia, działające w radykalnie różnych skalach czasu i odpowiadające na inne pytania.

Nic w tym badaniu nie osłabia dowodów na współczesną zmianę klimatu ani nie przemawia za opóźnianiem działań. Biosfera, która w jednym odległym scenariuszu modelowym może zachować część życia fotosyntetycznego, nie jest tym samym co klimat, w którym dzisiejsze społeczeństwa i ekosystemy pozostają bezpieczne.

Praca jest cenna, ponieważ nadaje odległemu pytaniu większą dyscyplinę. Pokazuje, że wcześniejsze, prostsze modele mogły powodować zbyt silne ocieplenie, gdy nasłonecznienie rosło przy stałym dwutlenku węgla, oraz że życie fotosyntetyczne może mieć więcej dróg przetrwania, niż sugeruje jeden kanoniczny próg węgla. Pokazuje również, dlaczego każda dodatkowa część miliarda lat jest obciążona łańcuchem założeń.

Słońce, które żywi liść, powoli się zmienia. To, czy Ziemia pozostanie zielona przez kolejne 1,35, 1,87 czy inną liczbę miliardów lat, będzie zależeć od wspólnej odpowiedzi skał, wody, atmosfery i życia. Uczciwym wynikiem nie jest data. Jest nim szerszy obraz tego kompromisu.

Zwięzłe podsumowanie

Trójwymiarowe badanie klimatu pyta, jak długo ziemska biosfera roślinna — fotosyntetyczna — może przetrwać, gdy Słońce powoli staje się jaśniejsze. Badacze obliczyli 29 odrębnych klimatów stanu ustalonego i prześledzili przez nie dwa ilustracyjne przypadki skrajne. Przy słabym wietrzeniu i stałym stężeniu dwutlenku węgla równym 400 części na milion przyjęte granice cieplne dla roślin lądowych przypadają za około 1,68 i 1,87 miliarda lat. Przy silnym wietrzeniu i globalnej średniej

temperaturze utrzymanej na poziomie 288 kelwinów, około 15 stopni Celsjusza, przyjęte granice dwutlenku węgla dla fotosyntezy przypadają za około 1,35, 1,64 oraz — przy użyciu wstępnego progu — 1,84 miliarda lat. Często cytowane 1,86 miliarda lat jest jedynie zaokrągloną średnią dwóch optymistycznych górnych punktów końcowych. Są to zależne od scenariusza przedziały modelowe, a nie data końca Ziemi, ludzkości ani całego życia. Model wykorzystuje narzucone ścieżki, współczesną geografię, ocean warstwowy i nie zawiera jawnego sprzężenia gleba–roślinność ani klimat–wietrzenie, a najdłuższe oszacowania zbliżają się do niepewnych granic efektu cieplarnianego i utraty oceanów.

Kontrola bez upiększeń

Co pokazuje praca: W tej konfiguracji ExoCAM trójwymiarowe klimaty na ogół ocieplają się mniej przy rosnącym nasłonecznieniu i stałym dwutlenku węgla niż uproszczone modele użyte do porównania. Dla dwóch narzuconych skrajnych przypadków wietrzenia i kilku przyjętych progów biologicznych granice biosfery roślinnej przypadają mniej więcej od 1,35 do 1,87 miliarda lat od dziś.

Co jest wiarygodne, lecz nieustalone: Że niektóre rośliny CAM lub rośliny wodne wykorzystujące rozpuszczony wodorowęglan mogłyby utrzymać fotosyntezę przy stężeniu bliskim jednej części dwutlenku węgla na milion; że adaptacja lub technologia mogłyby jeszcze wydłużyć życie fotosyntetyczne; oraz że rzeczywista ścieżka klimatu i wietrzenia pozostanie między dwoma skrajnymi przypadkami modelu.

Czego praca nie pokazuje: Stałej daty końca wszystkich roślin, całego życia, ludzkiej cywilizacji, ziemskich oceanów lub planety; jednej ciągłej symulacji kolejnych dwóch miliardów lat; ani żadnego powodu, by lekceważyć współczesną zmianę klimatu wywołaną przez człowieka.

Główne ograniczenia: Dwadzieścia dziewięć przypadków stanu ustalonego z jednej rodziny modeli klimatu; narzucone, a nie dynamicznie sprzężone ścieżki wietrzenia; współczesna geografia; ocean warstwowy; stałe stężenie metanu; zerowe nachylenie osi i mimośród; brak jawnych gleb, roślinności i sprzężenia zwrotnego biosfery; niepewne progi temperatury i dwutlenku węgla; oraz duża rozbieżność modeli w pobliżu wilgotnego i niekontrolowanego efektu cieplarnianego.

Jak duże zaufanie powinien mieć ogólny czytelnik? Wysokie do tego, że badanie poszerza wiarygodny zakres modeli i wskazuje założenia, które nim sterują. Umiarkowane do liczbowego przedziału jako użytecznego ograniczenia w ramach tego modelu. Niskie do jakiejkolwiek dokładnej daty, ponieważ najbardziej odległe punkty końcowe zależą od celowo skrajnych ścieżek klimatycznych i niepewnej biologii.

Źródła

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870