The Clean Paper

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

Kako dolgo lahko Zemlja ostane zelena? Podnebni model ponuja razpone, ne datuma sodnega dne

Devetindvajset tridimenzionalnih podnebnih simulacij postavlja različne meje Zemljine fotosintetske biosfere med približno 1,35 in 1,87 milijarde let v prihodnosti. Vrednosti so odvisne od namenoma poenostavljenih poti preperevanja kamnin, segrevanja in najnižjih ravni ogljikovega dioksida, ki bi jih rastline še lahko uporabljale. Ne napovedujejo, kdaj bodo izginile vse rastline, vse življenje, civilizacija ali planet.

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

Kako dolgo lahko Zemlja ostane zelena? Podnebni model ponuja razpone, ne datuma sodnega dne

List živi znotraj ozkega kompromisa. Potrebuje svetlobo, vodo, ogljikov dioksid in temperaturo, ki jo njegova kemija lahko prenaša. V človeškem življenju se Sonce zdi kot nespremenljiv del tega dogovora. V milijardi let pa ni.

Ko se Sonce na glavni veji stara, počasi postaja svetlejše. Več sončne svetlobe segreva Zemljo, vendar se planet na dolgi rok odziva: reakcije med deževnico, ogljikovim dioksidom in silikatnimi kamninami lahko iz ozračja odstranjujejo ogljikov dioksid. S tem se oslabi učinek tople grede in del segrevanja izravna. Toda isti odziv, ki planet hladi, lahko fotosintetskim organizmom sčasoma odvzame ogljik, iz katerega gradijo živo tkivo.

Nov članek v Journal of Geophysical Research: Atmospheres sprašuje, katera meja bi lahko prišla prej: preveč toplote ali premalo ogljikovega dioksida. Odgovor ni datum, ko bo Zemlja »umrla«. V dveh namenoma poenostavljenih poteh prihodnosti uporabljene meje za fotosintetsko življenje padejo približno med **1,35 in 1,87 milijarde let od danes**.

Ta razpon govori o **vegetativni biosferi**: delu Zemljinega živega sistema, ki ga vzdržujejo fotosintetski organizmi, zlasti rastline in drugo življenje, ki svetlobo in ogljikov dioksid pretvarja v biološko snov. Ni napoved za vsak mikrob. Ni življenjska doba človeške civilizacije. In ni življenjska doba planeta.

Planetarni termostat ima dve negotovi nastavitvi

Osrednja negotovost je **preperevanje silikatov**. Ogljikov dioksid se raztaplja v deževnici, reagira s silikatnimi kamninami in se sčasoma prenaša proti oceanom in sedimentom. Vulkani na geoloških časovnih skalah ogljikov dioksid vračajo. Ti procesi skupaj tvorijo del karbonatno-silikatnega cikla, ki ga pogosto opisujejo kot planetarni termostat.

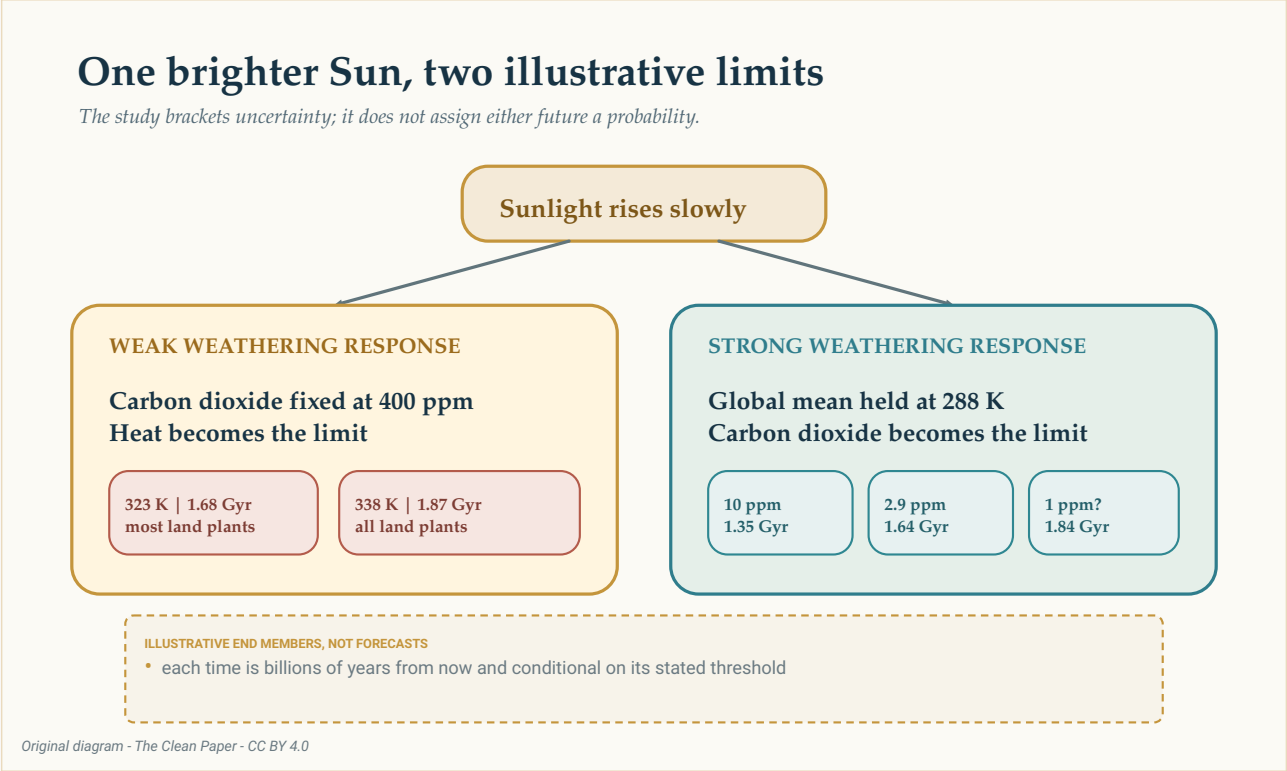
V toplejšem in bolj vlažnem svetu se lahko preperevanje pospeši in hitreje odstranjuje ogljikov dioksid. Toda znanstveniki ne vedo, kako močno bo ta odziv nadzoroval Zemljo pod svetlejšim prihodnjim Soncem. Jacob Haqq-Misra in Eric Wolf zato nista izbrala ene domnevno pravilne poti. Modelirala sta dva **skrajna člena**: namenoma ekstremna primera, ki omejujeta območje negotovosti.

- V **skrajnem primeru šibkega preperevanja** ostane atmosferski ogljikov dioksid pri 400 delcih na milijon, medtem ko svetlejše Sonce zvišuje temperaturo.
- V **skrajnem primeru močnega preperevanja** ostane globalna povprečna površinska temperatura pri 288 kelvinih, približno 15 stopinjah Celzija, medtem ko se z naraščanjem sončne svetlobe količina ogljikovega dioksida zmanjšuje.

Nobena veja ni predstavljena kot dejanska prihodnost Zemlje. Prva sprašuje, kaj bi naredila vročina, če bi ogljikov dioksid ostal visok. Druga sprašuje, kaj bi pomenilo pomanjkanje ogljika, če bi preperevanje globalno temperaturo zadrževalo blizu današnjega povprečja.

Kako lahko preperevanje deluje kot termostat?

Primerjava govori o povratni zanki, ne o dobesednem gumbu za uravnavanje. Ko toplejše podnebje pospeši kemično preperevanje, lahko več atmosferskega ogljikovega dioksida konča v raztopljenih snoveh, mineralih in sedimentih. Odstranjevanje tega toplogrednega plina nasprotuje delu začetnega segrevanja. Na zelo dolgih časovnih skalah vulkansko razplinjevanje ogljikov dioksid vrača.
Moč vsakega člena je odvisna od padavin, izpostavljenih kamnin, erozije, biologije, tektonike in kemije oceanov. Zato članek preizkuša omejujoče odzive, namesto da bi termostat obravnaval kot dobro poznan stroj.



Članek negotovo prihodnost omejuje z dvema ilustrativnima skrajnima primeroma. Če se preperevanje odziva šibko, naraščajoča vročina doseže privzete meje za kopenske rastline. Če se odziva močno, padajoči ogljikov dioksid doseže privzete meje fotosinteze. To sta pogojni veji modela, ne verjetnosti ali datuma odštevanja.

The Clean Paper CC BY 4.0

Devetindvajset ustaljenih modelnih svetov, ne en dvomilijardni film

Raziskovalca sta uporabila ExoCAM, tridimenzionalni globalni podnebni model, in izračunala **29 stacionarnih podnebij** za kombinacije močnejše sončne svetlobe in nižjega ogljikovega dioksida. Vsak

primer je tekel 70 modelnih let. Modelno leto je tukaj en simuliran letni cikel pri nespremenjenih pogojih: to je čas izvajanja, ki umetnemu podnebju omogoči, da se ustali, ne en korak v letni napovedi prihodnosti Zemlje. Ko je simulirano podnebje dobilo čas za ustalitev, so povprečili zadnjih 20 let.

Teh 29 primerov je 29 ločenih modelnih svetov. Vsak tek je ena točka v mreži in odgovarja na vprašanje: »Katero ustaljeno podnebje ustreza tej izbrani kombinaciji sončne svetlobe in ogljikovega dioksida?« Računalnik ni začel z današnjo Zemljo ter nato neprekinjeno razvijal njenega ozračja, kamnin, oceanov in živih bitij naslednji dve milijardi let. Avtorja sta namesto tega po teh vnaprej izračunanih točkah začrtala dve shematični poti preperevanja; poti med posameznimi točkami same niso bile simulirane.

Tabela povzema kombinacije sončne svetlobe in ogljikovega dioksida iz uradnega arhiva modelnih podatkov. Oznake primerov so tukaj dodane kot pomoč pri branju in sledijo vrstnemu redu arhiva. **S/S0** je relativna Sončeva konstanta: v modelu uporabljena vhodna sončna energija, deljena z današnjo vrednostjo S0. Vrednost 1,2 zato pomeni 20 odstotkov več vhodne sončne energije kot danes. **CO2 (ppm)** je mešalno razmerje atmosferskega ogljikovega dioksida, izraženo kot število molekul na milijon molekul ozračja.

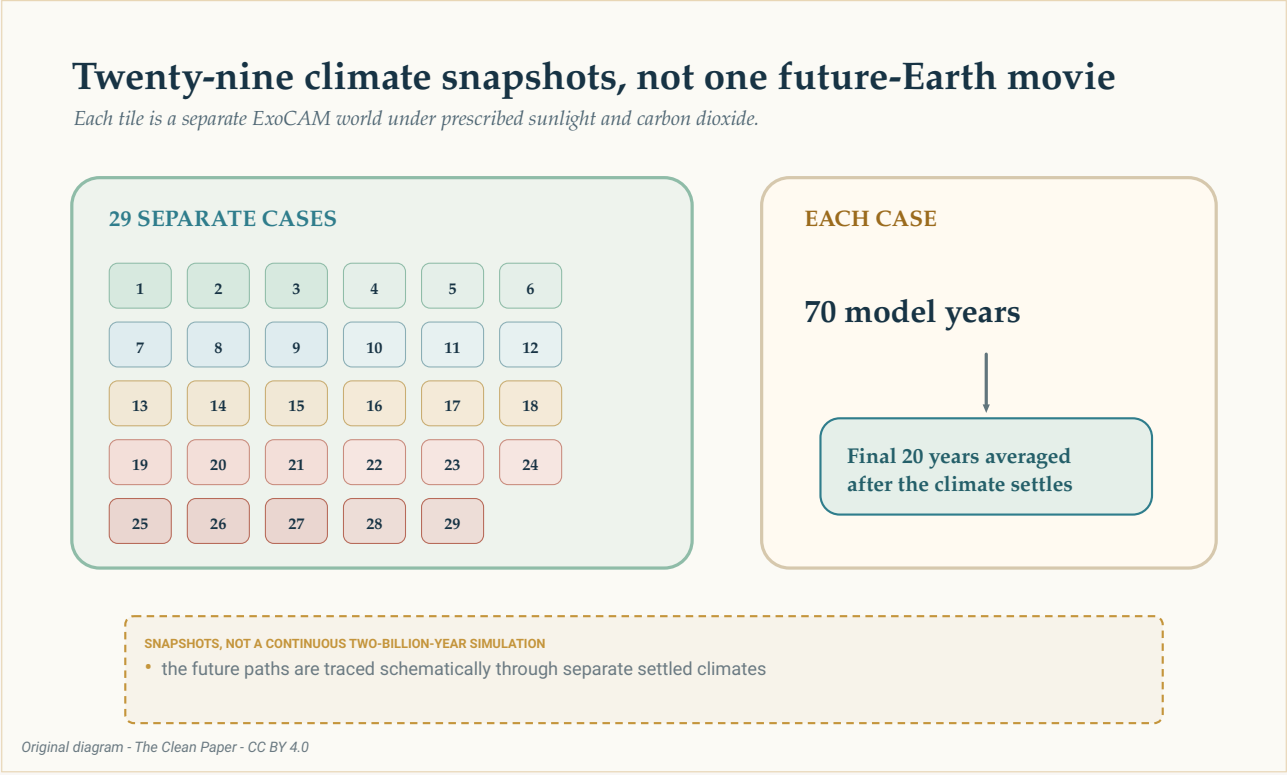
ID primera	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	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

ID primera	S/S0	CO2 (ppm)
28	1.2	0.45
29	1.2	0

Modelna Zemlja je prepoznavna, vendar namenoma omejena. Ima velikost Zemlje in današnjo geografijo. Namesto oceana s popolno cirkulacijo uporablja poenostavljen ploščni ocean, atmosferski tlak je nastavljen približno na današnjo zemeljsko vrednost (en bar), metan pa je fiksen. Orbita je popolnoma krožna (ničelna ekscentričnost), rotacijska os pa nima nagiba (ničelna poševnost). Model nima eksplicitnih tal, vegetacije ali povratnih učinkov spreminjajoče se biosfere. Najpomembneje pa je, da podnebni model ni dinamično sklopljen z modelom preperevanja kamnin. Z drugimi besedami: ExoCAM ne izračuna preperevanja, z njim ne posodobi ogljikovega dioksida in nato ne požene naslednjega podnebja v povratni zanki. Raziskovalca sta namesto tega predpisala dve omejujoči poti in ju sledila skozi mrežo 29 podnebij.

Kaj v podnebnem modelu pomeni »stacionarno stanje«?

Stacionarni primer je modelno podnebje, ki se mu pri enem izbranem Soncu in ozračju pusti, da se ustali. Vreme se v simulaciji še vedno spreminja iz dneva v dan in iz leta v leto, vendar dolgoročna povprečja nehajo močno drseti.
To je uporabno za vprašanje »kakšno podnebje ustreza tem pogojem?«. Razlikuje se od napovedovanja natančne poti, po kateri bi resnična Zemlja prešla iz enega sklopa pogojev v drugega.



Vsaka ploščica je ločen podnebni tek ExoCAM za 70 modelnih let, pri katerem je povprečenih zadnjih 20 let. Študija je vzorčila 29 ustaljenih podnebij pri predpisanih pogojih sončne svetlobe in ogljikovega dioksida; ni simulirala ene Zemlje, ki bi se neprekinjeno razvijala dve milijardi let.

The Clean Paper CC BY 4.0

Skrajni primer ena: dovolj ogljikovega dioksida, preveč vročine

V veji šibkega preperevanja ostane ogljikov dioksid pri 400 delcih na milijon. Ko narašča sončni dotok, postane omejujoči dejavnik vročina.

Članek uporablja dve mejni globalni povprečni temperaturi iz prejšnjih del:

- Pri **323 kelvinih**, približno **50 stopinjah Celzija** globalnega letnega povprečja, svet obravnavajo kot prevroč za večino kopenskih rastlin. Model to mejo doseže čez približno **1,68 milijarde let**.
- Pri **338 kelvinih**, približno **65 stopinjah Celzija** globalnega letnega povprečja, svet obravnavajo kot prevroč za vse kopenske rastline. Model to mejo doseže čez približno **1,87 milijarde let**.

To so privzete biološke meje, ne univerzalne temperature, pri katerih bi nujno odpovedal vsak fotosintetski organizem. Globalno povprečje prav tako skriva velike regionalne razlike. Študija ločeno preučuje, kje bi lahko kombinacije temperature in vode ostale primerne, vendar oznaka na podnebnem zemljevidu ne more popisati vseh prihodnjih zatočišč ali prilagoditev.

Skrajni primer dve: sprejemljiva temperatura, premalo ogljikovega dioksida

V veji močnega preperevanja je globalna povprečna temperatura zadržana pri 288 kelvinih, približno 15 stopinjah Celzija, medtem ko atmosferski ogljikov dioksid pada. Tukaj je odgovor odvisen od tega, kako malo ogljika bi lahko uporabljale različne poti fotosinteze.

- Pri tradicionalni meji **10 delcev na milijon** — 10 molekul ogljikovega dioksida na milijon molekul ozračja — meja za fotosintezo C4 nastopi čez približno **1,35 milijarde let**. Fotosintezo C4 uporabljajo med drugim koruza in sladkorni trs; ogljikov dioksid koncentrira okoli encima, ki ga veže.
- Če uporabimo alternativno mejo C4 **2,9 delca na milijon**, o kateri govori prejšnja literatura, se meja premakne na približno **1,64 milijarde let**.
- Poskusna meja **1 delec na milijon**, povezana z morebitnim vztrajanjem nekaterih rastlin CAM — rastlin s presnovo kislin tolstičnic, ki ponoči zajemajo ogljikov dioksid, podnevi pa ga uporabljajo — ali vodnih rastlin, ki lahko izkoriščajo raztopljeni bikarbonat, jo premakne na približno **1,84 milijarde let**.

Zadnje število ima največjo biološko opombo. Avtorja izrecno pravita, da je meja enega delca na milijon poskusna. To ni eksperimentalno potrjena meja preživetja vseh rastlin CAM ali vodne vegetacije v pogojih prihodnje Zemlje.

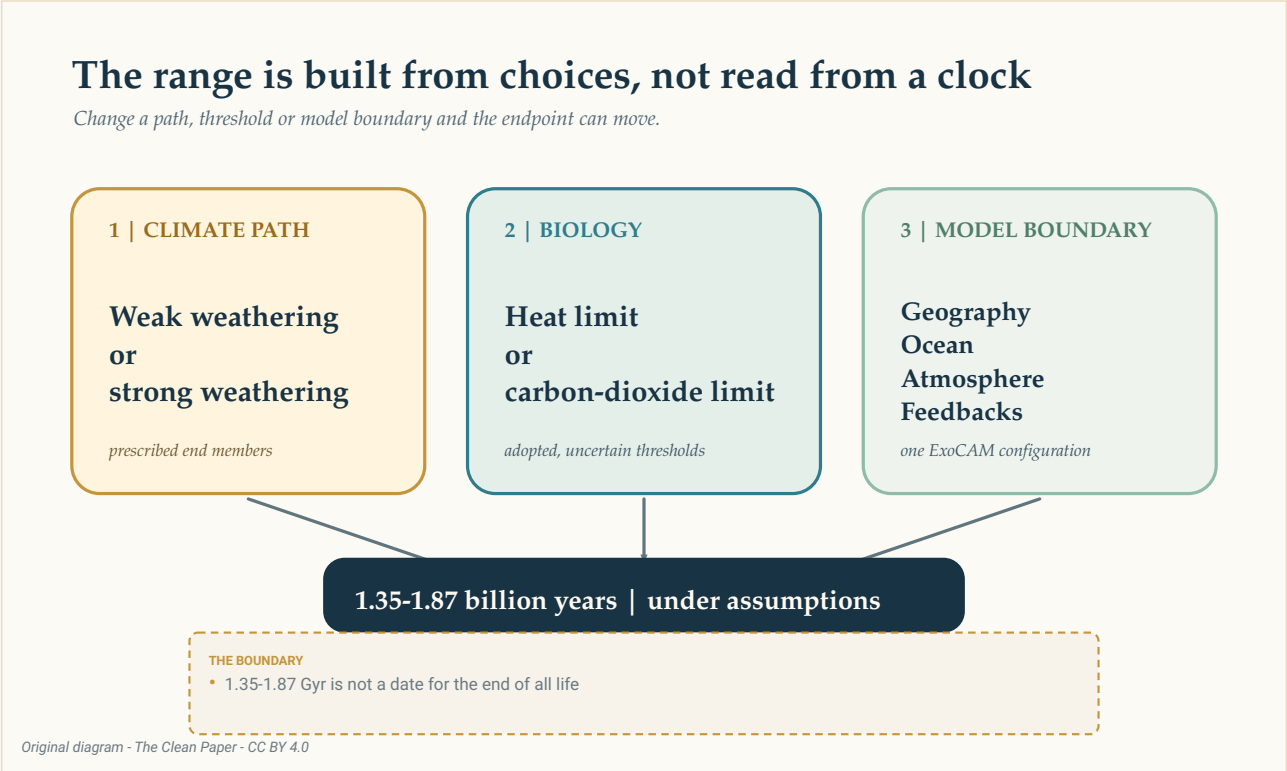
C3, C4 in CAM so strategije, ne lestvica

Rastline uporabljajo različne biokemične poti za zajemanje ogljika. **Fotosinteza C3** je najpogostejša. **Fotosinteza C4**, ki jo uporabljajo med drugim koruza in sladkorni trs, koncentrira ogljikov dioksid okoli encima, ki veže ogljik, in lahko bolje deluje, kadar je ogljikovega dioksida malo. **Presnova kislin tolstičnic (CAM)** loči zajem ogljika in njegovo uporabo med nočjo in dnevom, kar mnogim rastlinam pomaga varčevati z vodo.
To so družine strategij z mnogimi razlikami med vrstami, ne zaporedne stopnje »boljših« rastlin. Zelo nizke meje ogljikovega dioksida v članku so predpostavke za raziskovanje možnih meja, ne jamstvo, da se bo prihodnji ekosistem razvil tako, da jih bo lahko uporabljal.

Zakaj 1,86 milijarde let ni rok uporabe

Glavna ocena članka, približno **1,86 milijarde let**, je povprečje dveh optimističnih zgornjih mej: 1,84 milijarde let v veji, omejeni z ogljikovim dioksidom, in 1,87 milijarde let v veji, omejeni z vročino. To je zgoščen povzetek dveh različnih scenarijev. Ni tretji rezultat modela z večjo natančnostjo in ni datum najboljše ocene.

Tudi širši razpon od 1,35 do 1,87 milijarde let nima ene same verjetnosti. Spodnja in zgornja vrednost sta odvisni od različnih predpostavk o preperevanju, različnih bioloških mej in ene konfiguracije podnebnega modela. Razpon meri izbire v poskusu skoraj toliko kot čas.



Razpon od 1,35 do 1,87 milijarde let nastane šele po izbiri poti preperevanja, biološke meje in meje modela. To je zemljevid predpostavk, ne ura, ki odšteva do izumrtja vsega življenja.

The Clean Paper CC BY 4.0

Druge meje lahko pridejo prej

Najdaljše ocene vegetativne biosfere se približajo ločeni in negotovi meji: vlažnemu ali pobeglemu učinku tople grede, ki bi lahko povzročil veliko izgubo oceanov. Podnebni modeli se precej razlikujejo glede tega, kdaj bi se ti stanji začeli ob naraščajoči sončni svetlobi, še posebej daleč od današnjih pogojev. Nekatere ocene ju postavljajo pred najbolj optimistično mejo fotosinteze.

Zato zgornje veje ni mogoče brati kot obljubo, da bo Zemlja ohranila oceane, znane celine ali bivalne površinske pogoje do čez 1,87 milijarde let. Model prav tako ne vključuje prihodnje tektonike plošč, sprememb kopenske površine, razvijajočih se ekosistemov ali popolnoma dinamičnega oceana. Tudi izračuni, kako ozračje absorbira in oddaja energijo, so potisnjeni v režime zelo močne sončne svetlobe in izredno malo ogljikovega dioksida, kjer se različni modeli razhajajo.

Evolucijska prilagoditev in tehnološki posegi se v razpravi članka pojavijo kot možnosti. Niso rezultat 29 podnebnih simulacij. Model ne pokaže, da se bodo prihodnji organizmi razvili do fotosinteze pri enem delcu na milijon, in ne pokaže civilizacije, ki bi milijardo let upravljala ozračje.

To ni rezultat o današnji podnebni krizi

Svetlenje Sonca deluje skozi stotine milijonov do milijarde let. Sodobno segrevanje, ki ga povzroča človek, nastaja zaradi hitrega povečanja toplogrednih plinov v desetletjih in stoletjih. Gre za različna prisilna vpliva na radikalno različnih časovnih skalah, ki odgovarjata na različna vprašanja.

Nič v tej študiji ne zmanjšuje dokazov za sedanje podnebne spremembe in ne podpira odlaganja ukrepanja. Biosfera, ki bi v nekem oddaljenem modelnem scenariju lahko ohranila nekaj fotosintetskega življenja, ni isto kot podnebje, v katerem bi bile današnje družbe in ekosistemi varni.

Članek je dragocen, ker zelo oddaljeno vprašanje obravnava bolj disciplinirano. Kaže, da so prejšnji preprostejši modeli morda segrevali preveč, ko je sončna svetloba naraščala, ogljikov dioksid pa ostajal fiksen, in da ima fotosintetsko življenje morda več poti do vztrajanja, kot nakazuje ena sama kanonična meja ogljika. Hkrati pokaže, zakaj je vsak dodaten delež milijarde let povezan z verigo predpostavk.

Sonce, ki hrani list, se počasi spreminja. Ali bo Zemlja ostala zelena še 1,35, 1,87 ali neko drugo število milijard let, bo odvisno od skupnega odziva kamnin, vode, ozračja in življenja. Pošten rezultat ni datum. Je širši pogled na ta kompromis.

Kratek povzetek

Tridimenzionalna podnebna študija sprašuje, kako dolgo bi lahko Zemljina vegetativna — fotosintetska — biosfera vztrajala, ko Sonce počasi postaja svetlejše. Raziskovalca sta izračunala 29 ločenih stacionarnih podnebij in skoznje začrtala dva ilustrativna skrajna primera. Pri šibkem preperevanju in ogljikovem dioksidu, fiksiranem na 400 delcev na milijon, privzete temperaturne meje za kopenske rastline nastopijo čez približno 1,68 in 1,87 milijarde let. Pri močnem preperevanju in globalni povprečni temperaturi, fiksirani na 288 kelvinov oziroma približno 15 stopinj Celzija, privzete meje ogljikovega dioksida za fotosintezo nastopijo čez približno 1,35, 1,64 in — ob poskusni meji — 1,84 milijarde let. Pogosto citiranih 1,86 milijarde let je samo zaokroženo povprečje dveh optimističnih zgornjih koncev. To so od scenarija odvisni modelni razponi, ne datum konca Zemlje, človeštva ali vsega življenja. Model uporablja predpisane poti, današnjo geografijo, ploščni ocean in nima eksplicitne sklopitve tla–vegetacija ali podnebje–preperevanje, najdaljše ocene pa se približujejo negotovim mejam učinka tople grede in izgube oceanov.

Preverjanje brez olepševanja

Kaj članek pokaže: V tej konfiguraciji ExoCAM se tridimenzionalna podnebja ob naraščajoči sončni svetlobi in fiksnem ogljikovem dioksidu na splošno segrejejo manj kot poenostavljeni modeli, uporabljeni za primerjavo. V dveh predpisanih skrajnih primerih preperevanja in ob več privzetih bioloških mejah omejitve vegetativne biosfere padejo približno med 1,35 in 1,87 milijarde let od

danes.

Kaj je verjetno, vendar ni potrjeno: Da bi nekatere rastline CAM ali vodne rastline, ki uporabljajo raztopljeni bikarbonat, lahko ohranile fotosintezo pri približno enem delcu atmosferskega ogljikovega dioksida na milijon; da bi prilagoditev ali tehnologija fotosintetsko življenje podaljšala še dlje; in da bo dejanska pot podnebje–preperevanje ostala med obema skrajnima primeroma modela.

Česa članek ne pokaže: Fiksnega datuma konca vseh rastlin, vsega življenja, človeške civilizacije, Zemljinih oceanov ali planeta; ene neprekinjene simulacije naslednjih dveh milijard let; ali kakršnegakoli razloga za podcenjevanje današnjih podnebnih sprememb, ki jih povzroča človek.

Glavne omejitve: Devetindvajset stacionarnih primerov iz ene družine podnebnih modelov; predpisane in ne dinamično sklopljene poti preperevanja; današnja geografija; ploščni ocean; fiksen metan; ničelna poševnost in ekscentričnost; brez eksplicitnih tal, vegetacije ali povratne zanke biosfere; negotove temperaturne in CO2-meje ter veliko nesoglasje med modeli blizu vlažnega in pobeglega učinka tople grede.

Koliko zaupanja naj ima splošni bralec? Veliko zaupanje, da študija razširi verjeten modelni razpon in pokaže predpostavke, ki ga nadzorujejo. Zmerno zaupanje v številčni razpon kot uporabno omejitev znotraj tega modela. Malo zaupanja v katerikoli natančen datum, ker so najbolj oddaljene končne točke odvisne od namenoma skrajnih podnebnih poti in negotove biologije.

Viri

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