The Clean Paper

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

Ako dlho môže Zem zostať zelená? Klimatický model ponúka rozsahy, nie dátum konca sveta

Dvadsaťdeväť trojrozmerných klimatických simulácií kladie rôzne hranice fotosyntetickej biosféry Zeme približne 1,35 až 1,87 miliardy rokov do budúcnosti. Hodnoty závisia od zámerne zjednodušených scenárov zvetrávania hornín, tepla a najnižších koncentrácií oxidu uhličitého, ktoré by rastliny mohli využívať. Nepredpovedajú, kedy zaniknú všetky rastliny, všetok život, civilizácia ani planéta.

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

Ako dlho môže Zem zostať zelená? Klimatický model ponúka rozsahy, nie dátum konca sveta

List žije v rámci úzkej dohody. Potrebuje svetlo, vodu, oxid uhličitý a teplotu, ktorú jeho chémia znesie. Počas ľudského života sa Slnko zdá byť pevnou súčasťou tejto dohody. V priebehu miliardy rokov ňou nie je.

Ako Slnko starne na hlavnej postupnosti, pomaly sa zjasňuje. Viac slnečného žiarenia ohrieva Zem, planéta však reaguje v dlhom časovom horizonte: reakcie medzi dažďovou vodou, oxidom uhličitým a kremičitanovými horninami môžu odstraňovať oxid uhličitý z atmosféry. Tým sa oslabuje skleníkový efekt a časť otepľovania sa vyrovnáva. Rovnaká reakcia, ktorá planétu ochladzuje, môže napokon pripraviť fotosyntetické organizmy o uhlík, z ktorého budujú živé tkanivo.

Nový článok v Journal of Geophysical Research: Atmospheres sa pýta, ktorá hranica môže prísť skôr: priveľa tepla alebo primálo oxidu uhličitého. Odpoveďou nie je dátum, keď Zem zomrie. V dvoch zámerne zjednodušených scenároch budúcnosti ležia prijaté hranice fotosyntetického života približne **1,35 až 1,87 miliardy rokov v budúcnosti**.

Tento rozsah sa týka **vegetačnej biosféry**: časti živého systému Zeme udržiavanej fotosyntetickými organizmami, najmä rastlinami a ďalším životom premieňajúcim svetlo a oxid uhličitý na biologický materiál. Nie je to prognóza pre každý mikrób. Nie je to životnosť ľudskej civilizácie. Nie je to životnosť planéty.

Planetárny termostat má dve neisté nastavenia

Ústrednou neistotou je **zvetrávanie kremičitanov**. Oxid uhličitý sa rozpúšťa v dažďovej vode, reaguje s kremičitanovými horninami a napokon sa prenáša do oceánov a sedimentov. Sopky počas geologického času oxid uhličitý vracajú. Tieto procesy spolu tvoria časť uhlíkovo-kremičitanového cyklu, ktorý sa často opisuje ako planetárny termostat.

V teplejšom a vlhkejšom svete sa môže zvetrávanie zrýchliť a odstraňovať oxid uhličitý rýchlejšie. Vedci však nevedia, ako silno bude táto reakcia riadiť Zem pod jasnejším budúcim Slnkom. Jacob Haqq-Misra a Eric Wolf preto nezvolili jednu údajne správnu cestu. Modelovali dva **krajné prípady**: zámerne extrémne scenáre, ktoré ohraničujú neistotu.

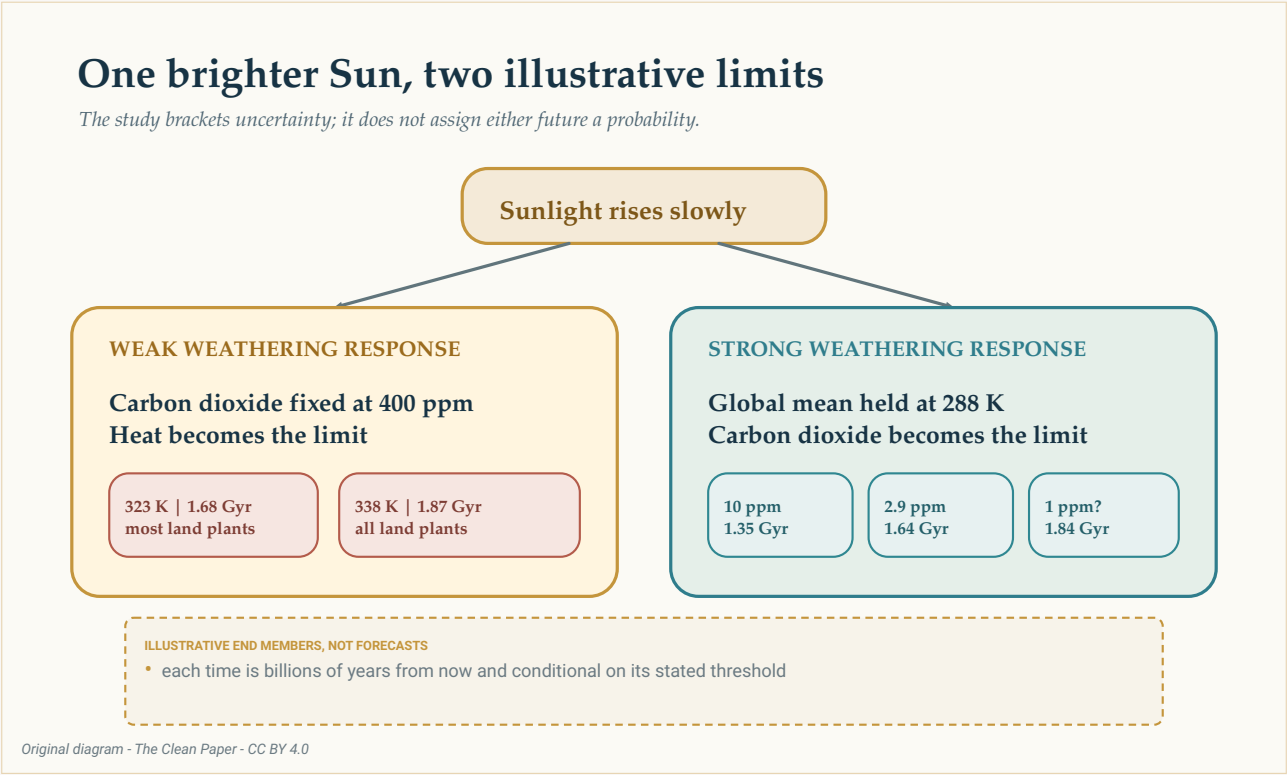
- V **krajnom prípade slabého zvetrávania** zostáva atmosférický oxid uhličitý na úrovni 400 častí na milión, zatiaľ čo jasnejšie Slnko zvyšuje teplotu.
- V **krajnom prípade silného zvetrávania** zostáva globálna priemerná povrchová teplota na 288 kelvinoch, približne 15 stupňoch Celzia, zatiaľ čo so zvyšujúcim sa slnečným žiarením oxid uhličitý klesá.

Ani jedna vetva nie je predstavená ako skutočná budúcnosť Zeme. Prvá sa pýta, čo by urobilo teplo, keby oxid uhličitý zostal vysoký. Druhá sa pýta, čo by spôsobilo uhlíkové hladovanie, keby zvetrávanie

udržalo globálnu teplotu blízko dnešného priemeru.

Ako môže zvetrávanie fungovať ako termostat?

Analógia sa týka spätnej väzby, nie doslovného ovládacieho kolieska. Keď teplejšia klíma zrýchli chemické zvetrávanie, viac atmosférického oxidu uhličitého môže skončiť v rozpustenom materiáli, mineráloch a sedimentoch. Odstránenie tohto skleníkového plynu pôsobí proti časti pôvodného otepľovania. V geologických časových mierkach oxid uhličitý vracia sopečné odplyňovanie.
Sila každého článku závisí od zrážok, odkrytej horniny, erózie, biológie, tektoniky a chémie oceánu. Preto článok testuje hraničné reakcie namiesto toho, aby termostat považoval za známy stroj.



Článok ohraničuje neistú budúcnosť dvoma ilustračnými krajnými prípadmi. Ak zvetrávanie reaguje slabo, stúpajúce teplo dosiahne prijaté prahy suchozemských rastlín. Ak reaguje silno, klesajúci oxid uhličitý dosiahne prijaté prahy fotosyntézy. Ide o podmienené vetvy modelu, nie pravdepodobnosti ani dátumy odpočítavania.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dvadsaťdeväť ustálených modelových svetov, nie jeden dvojmiliardový film

Výskumníci použili ExoCAM, trojrozmerný globálny klimatický model, na výpočet **29 ustálených klimatických stavov** pri kombináciách silnejšieho slnečného žiarenia a nižšieho oxidu uhličitého. Každý prípad bežal 70 modelových rokov. Jeden modelový rok tu znamená jeden simulovaný ročný cyklus pri pevných podmienkach: ide o čas behu potrebný na ustálenie umelej klímy, nie o jeden krok v každoročnej prognóze budúcnosti Zeme. Po ustálení simulovanej klímy sa spriemerovalo posledných 20 rokov.

Týchto 29 prípadov sú samostatné modelové svety. Každý beh je jedným bodom v mriežke a odpovedá na otázku: „Aká ustálená klíma zodpovedá tejto zvolenej dvojici slnečného žiarenia a oxidu uhličitého?“ Počítač nezačal dnešnou Zemou a nevyvíjal jej atmosféru, horniny, oceány a živé organizmy súvisle počas nasledujúcich dvoch miliárd rokov. Autori namiesto toho viedli dva schematické scenáre zvetrávania cez vopred vypočítané body; samotná cesta medzi bodmi simulovaná nebola.

Tabuľka reprodukuje kombinácie slnečného žiarenia a oxidu uhličitého z oficiálneho archívu modelových údajov. Identifikátory prípadov sú pomôcky na čítanie pridané tu v poradí archívu. **S/S0** je relatívna slnečná konštanta: prichádzajúca slnečná energia použitá v modeli vydelená dnešnou hodnotou S0. Hodnota 1,2 teda znamená o 20 percent viac prichádzajúcej slnečnej energie než dnes. **CO2 (ppm)** je zmiešavací pomer atmosférického oxidu uhličitého v molekulách na milión molekúl atmosféry.

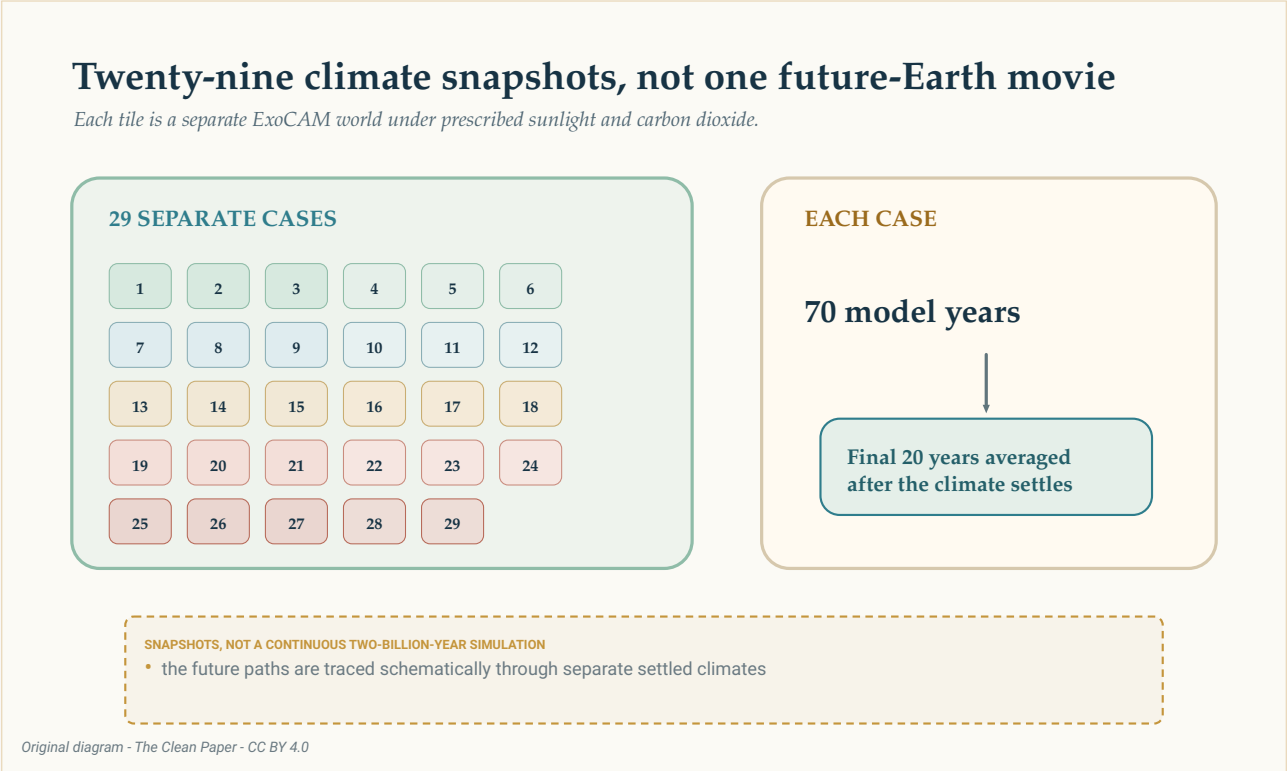
ID prípadu	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400

ID prípadu	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

Modelová Zem je rozpoznateľná, ale zámerne obmedzená. Má veľkosť Zeme a používa dnešnú geografiu. Namiesto plne cirkulujúceho oceánu obsahuje zjednodušený doskový oceán, atmosférický tlak nastavený približne na dnešnú hodnotu Zeme (jeden bar) a pevné množstvo metánu. Jej obežná dráha je dokonale kruhová (nulová excentricita) a rotačná os nemá sklon (nulová obliquita). Model neobsahuje výslovnú reprezentáciu pôd, vegetácie ani spätnú väzbu meniacej sa biosféry. Najdôležitejšie je, že klimatický model nie je dynamicky spojený s modelom zvetrávania hornín. Inými slovami, ExoCAM nevypočíta zvetrávanie, nepoužije ho na aktualizáciu oxidu uhličitého a potom nespustí ďalšiu klímu v spätnej slučke. Výskumníci namiesto toho predpísali dva hraničné scenáre a viedli ich cez klimatickú mriežku 29 prípadov.

Čo znamená „ustálený stav“ v klimatickom modeli?

Prípad ustáleného stavu je modelová klíma, ktorá sa nechá ustáliť pri jednom zvolenom Slnku a atmosfére. Počas simulácie sa počasie naďalej mení zo dňa na deň a z roka na rok, jeho dlhodobé priemery však prestanú výrazne driftovať.
Je to užitočné pre otázku: „Aká klíma zodpovedá týmto podmienkam?“ Je to niečo iné než predpovedať presnú cestu, ktorou sa skutočná Zem presunie z jedného súboru podmienok do ďalšieho.



Každá dlaždica je samostatný klimatický beh ExoCAM v dĺžke 70 modelových rokov, z ktorého sa spriemerovalo posledných 20 rokov. Štúdia vzorkovala 29 ustálených klimatických stavov pri predpísaných podmienkach slnečného žiarenia a oxidu uhličitého; nesimulovala jednu súvisle sa vyvíjajúcu Zem počas dvoch miliárd rokov.

The Clean Paper CC BY 4.0

Krajný prípad jeden: dosť oxidu uhličitého, priveľa tepla

Vo vetve slabého zvetrávania zostáva oxid uhličitý pevne na 400 častiach na milión. Ako rastie slnečný príkon, obmedzujúcim faktorom sa stáva teplo.

Článok používa dva prahy globálnej priemernej teploty prevzaté zo staršej práce:

- Pri **323 kelvinoch**, približne **50 stupňoch Celzia** ako globálnom ročnom priemere, sa svet považuje za príliš horúci pre väčšinu suchozemských rastlín. Model dosiahne tento prah približne o **1,68 miliardy rokov**.
- Pri **338 kelvinoch**, približne **65 stupňoch Celzia** ako globálnom ročnom priemere, sa svet považuje za príliš horúci pre všetky suchozemské rastliny. Model dosiahne tento prah približne o **1,87 miliardy rokov**.

Ide o prijaté biologické hranice, nie univerzálne teploty, pri ktorých nevyhnutne zlyhá každý fotosyntetický organizmus. Globálny priemer navyše skrýva veľké regionálne rozdiely. Štúdia samostatne skúma, kde by mohli zostať vhodné kombinácie teploty a vody, označenie na klimatickej mape však nedokáže katalogizovať každé budúce útočisko ani adaptáciu.

Krajný prípad dva: znesiteľná teplota, primálo oxidu uhličitého

Vo vetve silného zvetrávania sa globálna priemerná teplota udržiava na 288 kelvinoch, približne 15 stupňoch Celzia, zatiaľ čo atmosférický oxid uhličitý klesá. Odpoveď tu závisí od toho, ako málo uhlíka môžu využívať rôzne fotosyntetické dráhy.

- Pri tradičnom prahu **10 častí na milión** — desať molekúl oxidu uhličitého na milión molekúl atmosféry — nastane hranica fotosyntézy C4 približne o **1,35 miliardy rokov**. Fotosyntézu C4 používajú napríklad kukurica a cukrová trstina a sústreďuje oxid uhličitý okolo enzýmu, ktorý ho viaže.
- Použitie alternatívneho prahu C4 **2,9 časti na milión**, o ktorom sa diskutovalo v staršej práci, ho posúva približne na **1,64 miliardy rokov**.
- Predbežný prah **1 časti na milión**, spojený s možným pretrvaním niektorých rastlín CAM — rastlín využívajúcich metabolizmus kyselín tučnolistých, ktorý oddeľuje príjem oxidu uhličitého v noci od jeho využitia cez deň — alebo vodných rastlín schopných využívať rozpustený hydrogénuhličitan, ho posúva približne na **1,84 miliardy rokov**.

Posledné číslo má najväčšiu biologickú výhradu. Autori výslovne označujú hranicu jednej časti na milión za predbežnú. Nie je to experimentálne ustanovený prah prežitia všetkých rastlín CAM ani vodnej vegetácie v podmienkach budúcej Zeme.

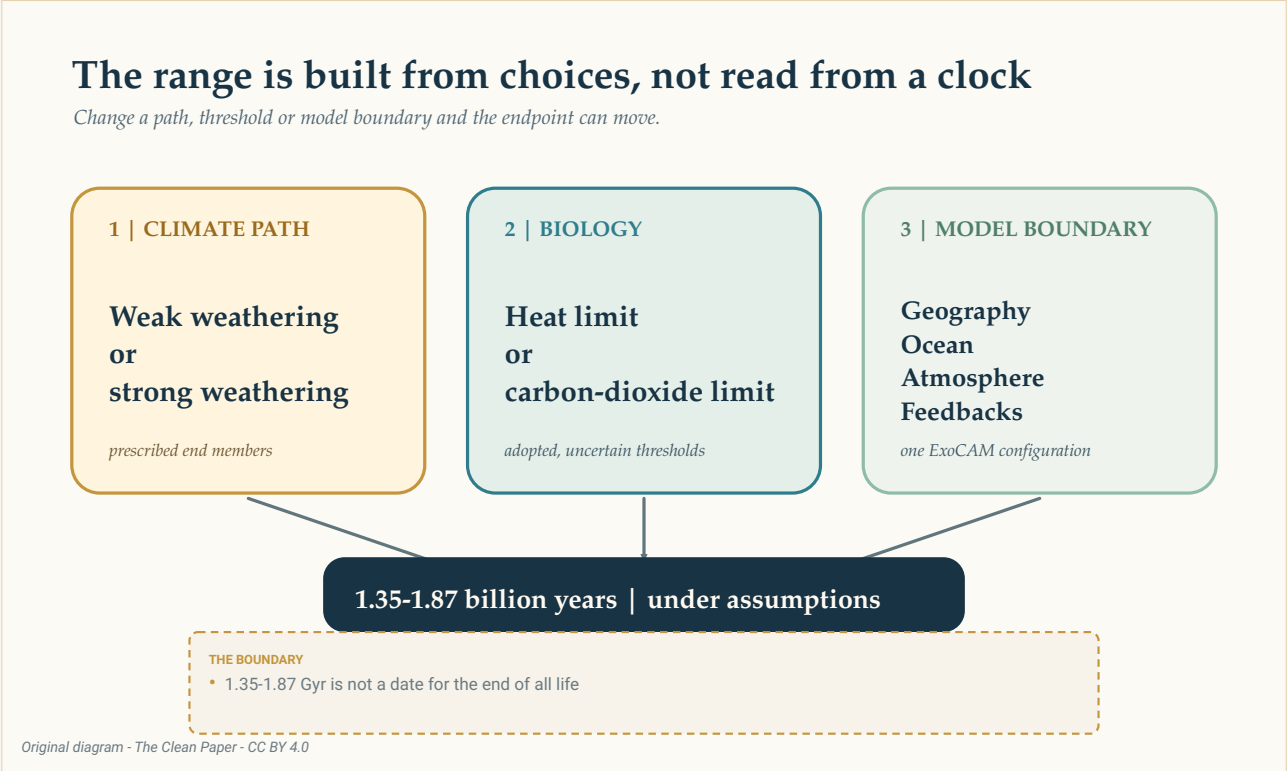
> **C3, C4 a CAM sú stratégie, nie rebríček**
>
> Rastliny používajú na zachytávanie uhlíka rôzne biochemické dráhy. **Fotosyntéza C3** je najbežnejšia. **Fotosyntéza C4**, ktorú používajú napríklad kukurica a cukrová trstina, sústreďuje oxid uhličitý okolo enzýmu viažuceho uhlík a môže fungovať lepšie pri jeho nedostatku. **Metabolizmus kyselín tučnolistých (CAM)** oddeľuje príjem a využitie uhlíka medzi noc a deň, čo mnohým rastlinám pomáha šetriť vodu.
> Ide o rodiny stratégií s mnohými rozdielmi medzi druhmi, nie o po sebe nasledujúce stupne „lepších“ rastlín. Veľmi nízke prahy oxidu uhličitého v článku sú predpoklady na skúmanie možných hraníc, nie záruky, že sa budúci ekosystém vyvinie tak, aby ich využíval.

Prečo 1,86 miliardy rokov nie je dátum exspirácie

Hlavný odhad článku približne **1,86 miliardy rokov** je priemerom dvoch optimistických horných koncových bodov: 1,84 miliardy rokov vo vetve obmedzenej oxidom uhličitým a 1,87 miliardy rokov vo vetve obmedzenej teplom. Je to kompaktné zhrnutie dvoch odlišných scenárov. Nie je to tretí výsledok modelu s vyššou presnosťou ani najlepší odhad dátumu.

Ani širšie rozpätie 1,35 až 1,87 miliardy rokov nemá jednu pravdepodobnosť. Jeho dolná a horná hodnota závisia od odlišných predpokladov zvetrávania, odlišných biologických prahov a jednej kon-

figurácie klimatického modelu. Rozsah meria voľby experimentu rovnako ako čas.



Rozpätie 1,35 až 1,87 miliardy rokov vzniká iba po zvolení scenára zvetrávania, biologického prahu a hraníc modelu. Je to mapa predpokladov, nie hodiny končiace vyhynutím všetkého života.

The Clean Paper CC BY 4.0

Iné hranice môžu prísť skôr

Najdlhšie odhady vegetačnej biosféry sa približujú k samostatnej a neistej hranici: vlhkému alebo nekontrolovanému skleníkovému efektu, ktorý by mohol viesť k veľkej strate oceánov. Klimatické modely sa výrazne rozchádzajú v tom, kedy sa tieto stavy začnú pri rastúcom slnečnom žiarení, najmä ďaleko od dnešných podmienok. Niektoré odhady ich umiestňujú pred najoptimistickejšiu hranicu fotosyntézy.

Hornú vetvu preto nemožno čítať ako prísľub, že Zem si zachová oceány, známe kontinenty alebo obývateľné povrchové podmienky až do času 1,87 miliardy rokov v budúcnosti. Model neobsahuje ani budúcu doskovú tektoniku, zmeny rozlohy súše, vyvíjajúce sa ekosystémy či plne dynamický oceán. Jeho výpočty absorpcie a vyžarovania energie atmosférou sa navyše posúvajú do režimov intenzívneho slnečného žiarenia a mimoriadne nízkeho oxidu uhličitého, v ktorých sa jednotlivé modely rozchádzajú.

Evolučná adaptácia a technologické zásahy sa v diskusii článku objavujú ako možnosti. Nie sú výstupmi 29 klimatických simulácií. Model neukazuje, že sa budúce organizmy vyvinú k fotosyntetickej dráhe fungujúcej pri jednej časti na milión, ani že civilizácia bude miliardu rokov riadiť atmosféru.

Toto nie je výsledok o dnešnej klimatickej kríze

Zjasňovanie Slnka pôsobí počas stoviek miliónov až miliárd rokov. Moderné otepľovanie spôsobené človekom pochádza z rýchlo rastúcich skleníkových plynov počas desaťročí a storočí. Ide o odlišné pôsobenia v radikálne odlišných časových mierkach, ktoré odpovedajú na iné otázky.

Nič v tejto štúdii neoslabuje dôkazy o súčasnej zmene klímy ani nepodporuje odkladanie opatrení. Biosféra, ktorá si môže v jednom vzdialenom modelovom scenári zachovať časť fotosyntetického života, nie je to isté ako klíma, v ktorej zostávajú dnešné spoločnosti a ekosystémy v bezpečí.

Článok je cenný, pretože vzdialenú otázku skúma disciplinovanejšie. Ukazuje, že staršie, jednoduchšie modely mohli pri rastúcom slnečnom žiarení a pevnom oxide uhličitom otepľovať priveľmi a že fotosyntetický život môže mať viac ciest pretrvania, než naznačuje jeden kanonický uhlíkový prah. Zároveň ukazuje, prečo je každá ďalšia časť miliardy rokov spojená s reťazcom predpokladov.

Slnko, ktoré živí list, sa pomaly mení. To, či Zem zostane zelená ďalších 1,35, 1,87 alebo iný počet miliárd rokov, bude závisieť od spoločnej reakcie hornín, vody, atmosféry a života. Poctivým výsledkom nie je dátum. Je ním širší pohľad na túto dohodu.

Stručné zhrnutie

Trojrozmerná klimatická štúdia sa pýta, ako dlho môže vegetačná — fotosyntetická — biosféra Zeme pretrvať, kým sa Slnko pomaly zjasňuje. Výskumníci vypočítali 29 samostatných ustálených klimatických stavov a viedli cez ne dva ilustračné krajné prípady. Pri slabom zvetrávaní a oxide uhličitom zafixovanom na 400 častiach na milión nastanú prijaté teplotné hranice suchozemských rastlín približne o 1,68 a 1,87 miliardy rokov. Pri silnom zvetrávaní a globálnej priemernej teplote zafixovanej na 288 kelvinoch, približne 15 stupňoch Celzia, nastanú prijaté hranice oxidu uhličitého pre fotosyntézu približne o 1,35, 1,64 a pri použití predbežného prahu 1,84 miliardy rokov. Často citovaných 1,86 miliardy rokov je iba zaokrúhlený priemer dvoch optimistických horných koncových bodov. Ide o modelové rozsahy závisiace od scenára, nie o dátum, keď zanikne Zem, ľudstvo alebo všetok život. Model používa predpísané scenáre, dnešnú geografiu, doskový oceán a žiadne výslovné prepojenie pôda–vegetácia ani klíma–zvetrávanie; najdlhšie odhady sa navyše približujú k neistým hraniciam skleníkového efektu a straty oceánov.

Kontrola bez príkras

Čo článok ukazuje: V tejto konfigurácii ExoCAM sa trojrozmerné klímy pri rastúcom slnečnom žiarení a pevnom oxide uhličitom vo všeobecnosti otepľujú menej než zjednodušené modely použité na porovnanie. Pri dvoch predpísaných krajných prípadoch zvetrávania a niekoľkých prijatých biologických prahoch ležia hranice vegetačnej biosféry približne 1,35 až 1,87 miliardy rokov v budúcnosti.

Čo je možné, ale nie ustanovené: Že niektoré rastliny CAM alebo vodné rastliny využívajúce rozpustený hydrogénuhličitan by mohli udržať fotosyntézu pri približne jednej časti atmosférického oxidu uhličitého na milión; že adaptácia alebo technológia by mohli fotosyntetický život ešte predĺžiť; a že skutočná cesta klímy a zvetrávania zostane medzi dvoma krajnými prípadmi modelu.

Čo článok neukazuje: Pevný dátum konca všetkých rastlín, všetkého života, ľudskej civilizácie, oceánov Zeme alebo planéty; jednu súvislú simuláciu nasledujúcich dvoch miliárd rokov; ani nijaký dôvod podceňovať dnešnú zmenu klímy spôsobenú človekom.

Hlavné obmedzenia: Dvadsaťdeväť prípadov ustáleného stavu z jednej rodiny klimatických modelov; predpísané, nie dynamicky spojené scenáre zvetrávania; dnešná geografia; doskový oceán; pevný metán; nulová obliquita a excentricita; žiadne výslovné pôdy, vegetácia ani spätná väzba biosféry; neisté teplotné a uhlíkové prahy; a veľké rozdiely medzi modelmi pri podmienkach vlhkého a nekontrolovaného skleníkového efektu.

Akú dôveru by mal mať bežný čitateľ? Vysokú dôveru, že štúdia rozširuje prijateľný modelový rozsah a identifikuje predpoklady, ktoré ho riadia. Strednú dôveru v číselné rozpätie ako užitočné ohraničenie v rámci tohto modelu. Nízku dôveru v akýkoľvek presný dátum, pretože najvzdialenejšie koncové body závisia od zámerne extrémnych klimatických scenárov a neistej biológie.

Zdroje

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