The Clean Paper

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

Koliko dugo Zemlja može ostati zelena? Klimatski model daje raspone, a ne datum sudnjeg dana

Dvadeset i devet trodimenzionalnih klimatskih simulacija postavlja različite granice za Zemljinu fotosintetsku biosferu između otprilike 1,35 i 1,87 milijardi godina od danas. Vrednosti zavise od namerno pojednostavljenih putanja trošenja stena i zagrevanja, kao i od najnižih nivoa ugljen-dioksida koje bi biljke mogle koristiti. One ne predviđaju kada će nestati sve biljke, sav život, civilizacija ili sama planeta.

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

Koliko dugo Zemlja može ostati zelena? Klimatski model daje raspone, a ne datum sudnjeg dana

List opstaje unutar uskog kompromisa. Treba svetlost, vodu, ugljen-dioksid i temperaturu koju njegova hemija može podnijeti. Tokom ljudskog života Sunce se čini kao nepromenjivi deo tog kompromisa. Tokom milijarde godina nije.

Kako Sunce stari na glavnom nizu, polako postaje sjajnije. Više Sunčeve svetlosti zagreva Zemlju, ali planet ima dugoročan odgovor: reakcije između kišnice, ugljen-dioksida i silikatnih stena mogu uklanjati ugljen-dioksid iz atmosfere. Time se slabi efekt staklenika i ublažava deo zagrevanja. No isti odgovor koji hladi planet na kraju može fotosintetskim organizmima oduzeti ugljenik kojim grade živo tkivo.

Novi rad u časopisu Journal of Geophysical Research: Atmospheres pita koja bi granica mogla stići prva: prevelika vrućina ili premalo ugljen-dioksida. Odgovor nije datum kada Zemlja umire. U dve namerno pojednostavljene buduće putanje, usvojene granice za fotosintetski život padaju između otprilike **1,35 i 1,87 milijardi godina od danas**.

Taj se raspon odnosi na **vegetativnu biosferu**: deo Zemljina živog sistema koji održavaju fotosintetski organizmi, naročito biljke i drugi oblici života koji svetlost i ugljen-dioksid pretvaraju u biološki materijal. To nije prognoza za svaki mikrob. Nije životni vek ljudske civilizacije. Nije životni vek planeta.

Planetarni termostat ima dve nesigurne postavke

Centralna neizvesnost je **trošenje silikatnih stena**. ugljen-dioksid otapa se u kišnici, reaguje sa silikatnim stenama i na kraju se prenosi prema okeanima i sedimentima. Vulkani tokom geoloških perioda vraćaju ugljen-dioksid. Ti procesi zajedno čine deo karbonatno-silikatnog ciklusa, koji se često opisuje kao planetarni termostat.

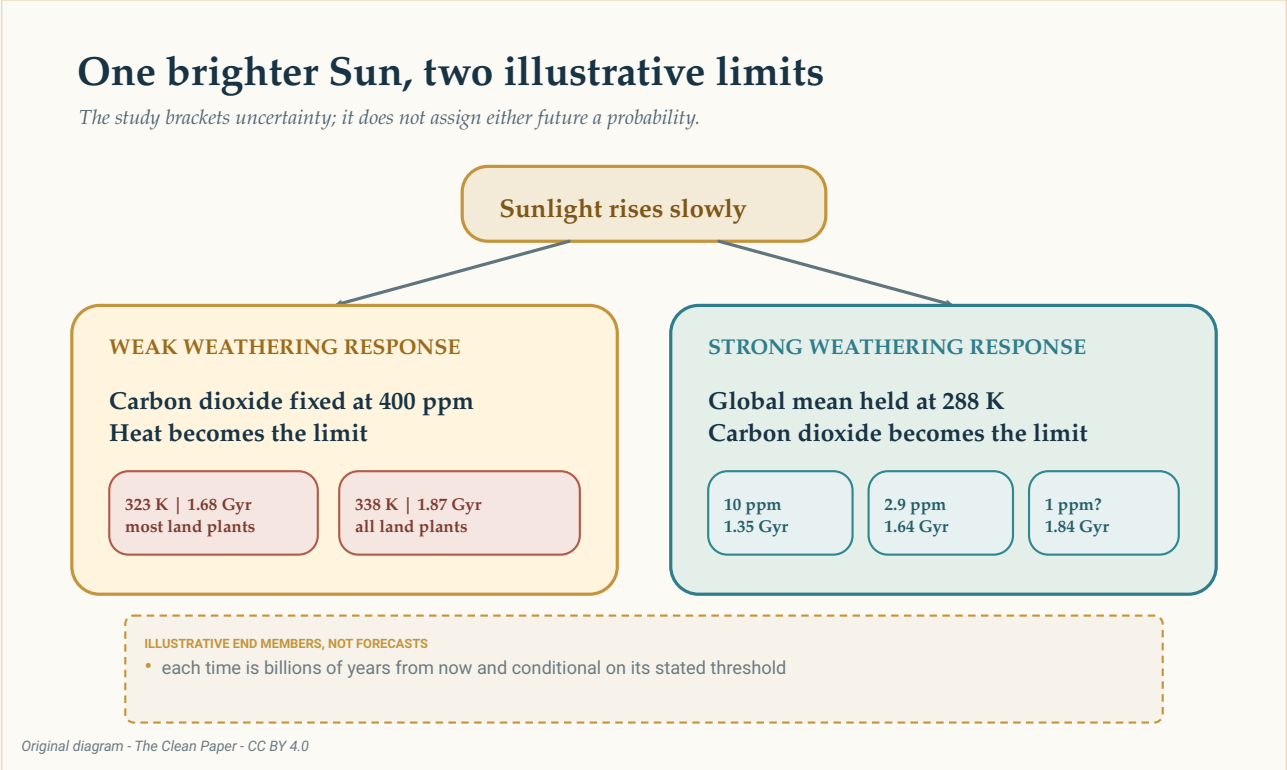
U toplijem i vlažnijem svetu trošenje stena može se ubrzati i brže uklanjati ugljen-dioksid. No naučnici ne znaju koliko će snažno taj odgovor upravljati Zemljom pod budućim sjajnijim Suncem. Jacob Haqq-Misra i Eric Wolf zato nisu izabrali jednu navodno ispravnu putanju. Modelirali su dva **granična slučaja**: namerno ekstremne scenarije koji omeđuju neizvesnost.

- U **graničnom slučaju slabog trošenja**, atmosferski ugljen-dioksid ostaje na 400 delova na milion, dok sve sjajnije Sunce podiže temperaturu.
- U **graničnom slučaju snažnog trošenja**, globalna srednja površinska temperatura ostaje na 288 kelvina, oko 15 stepeni Celzija, dok se s porastom Sunčevog zračenja količina ugljen-dioksida smanjuje.

Nijedna grana nije predstavljena kao stvarna Zemljina budućnost. Prva pita šta bi učinila vrućina kada bi ugljen-dioksid ostao visok. Druga pita šta bi učinio nedostatak ugljenika kada bi trošenje stena održavalo globalnu temperaturu blizu današnjeg proseka.

How trošenje stena može delovati poput termostata?

Analogija se odnosi na povratnu spregu, a ne na doslovni regulator. Kada toplija klima ubrza hemijsko trošenje, više atmosferskog ugljen-dioksida može završiti u rastvorenim supstancama, mineralima i sedimentima. Uklanjanje tog stakleničkog gasa suprotstavlja se delu početnog zagrevanja. Na vrlo dugim vremenskim skalama vulkansko oslobađanje gasova vraća ugljen-dioksid.
Snaga svake karike zavisi o oborinama, izloženim stenama, eroziji, biologiji, tektonici i hemiji okeana. Zato rad ispituje granične odzive umesto da termostat tretira kao poznat stroj.



Rad omeđuje neizvesnu budućnost s dva ilustrativna granična slučaja. Ako trošenje reaguje slabo, rastuća vrućina dostiže usvojene temperaturne pragove za kopnene biljke. Ako reaguje snažno, pad ugljen-dioksida dostiže usvojene pragove fotosinteze. To su uslovne grane modela, a ne verovatnoće ili datumi odbrojavanja.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dvadeset i devet ustaljenih modelskih svetova, a ne jedan film od dve milijarde godina

Istraživači su upotrebili ExoCAM, trodimenzionalni globalni klimatski model, kako bi izračunali **29 stacionarnih klima** za različite kombinacije jačeg Sunčevog zračenja i nižeg ugljen-dioksida. Svaki slučaj izvođen je 70 modelskih godina. Ovde jedna modelska godina znači jedan simulirani godišnji

ciklus pri fiksnim uslovima: to je vreme izvođenja potrebno da se veštačka klima ustali, a ne jedan korak u prognozi Zemljine budućnosti iz godine u godinu. Nakon što je simulirana klima imala vremena ustaliti se, izračunat je prosek posljednjih 20 godina.

Tih 29 slučajeva zasebni su modelski svetovi. Svako izvođenje jedna je tačka u mreži koja odgovara na pitanje: „Koja se ustaljena klima uklapa u ovu izabranu kombinaciju Sunčevog zračenja i ugljen-dioksida?" Računar nije krenuo od današnje Zemlje i zatim neprekidno razvijalo njenu atmosferu, stene, okeane i živi svet tokom sledeće dve milijarde godina. Autori su umesto toga kroz te unapred izračunate tačke pratili dve šematske putanje trošenja; sama putanja između tačaka nije simulirana.

Tablica reprodukuje kombinacije Sunčevog zračenja i ugljen-dioksida iz službene arhive podataka modela. ID-jevi slučajeva ovde su dodani kao pomoć pri čitanju, redosledom iz arhive. **S/S0** je relativna Sunčeva konstanta: ulazna Sunčeva energija korišćena u modelu podeljena s današnjom vrednošću, S0. Vrednost 1,2 stoga znači 20 posto više ulazne Sunčeve energije nego danas. **CO2 (ppm)** je odnos mešanja atmosferskog ugljen-dioksida, izražen brojem molekula na milion atmosferskih molekula.

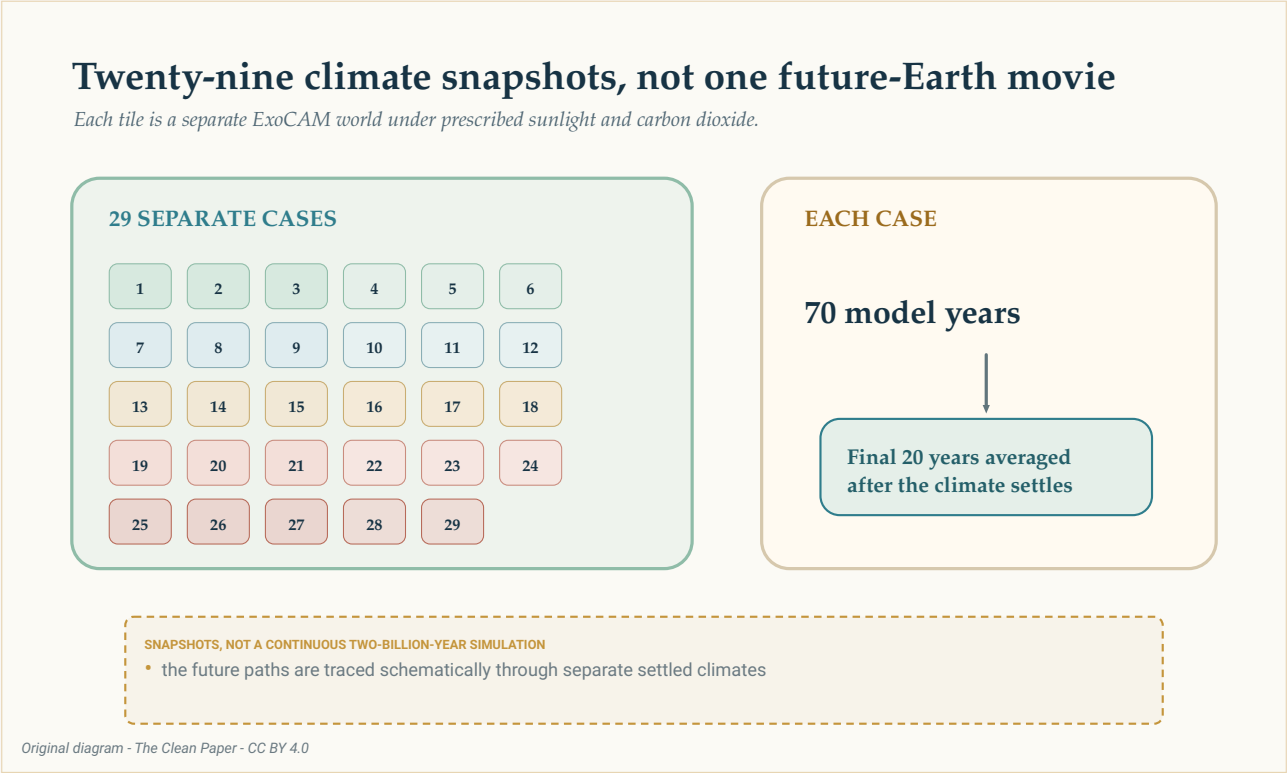
ID slučaja	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	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
28	1.2	0.45

ID slučaja	S/S0	CO2 (ppm)
29	1.2	0

Modelska Zemlja prepoznatljiva je, ali namerno ograničena. Veličine je Zemlje i koristi današnju geografiju. Ima pojednostavljeni okean bez pune okeanske cirkulacije, atmosferski pritisak postavljen približno na današnju Zemljinu vrednost (jedan bar) i fiksnu količinu metana. Orbita joj je savršeno kružna (nulti ekscentricitet), a os rotacije nema nagib (nulta nagnutost osi). Model nema izričito prikazana tla, vegetaciju ni povratne sprege promenjive biosfere. Najvažnije, klimatski model nije dinamički spojen s modelom trošenja stena. Drugim rečima, ExoCAM ne izračunava trošenje, koristi ga za ažuriranje ugljen-dioksida i zatim pokreće sledeću klimu u petlji povratne sprege. Istraživači su umesto toga zadali dve granične putanje i pratili ih kroz mrežu od 29 klimatskih slučajeva.

What „stacionarno stanje" znači u klimatskom modelu?

Slučaj stacionarnog stanja je modelska klima kojoj je dozvoljeno da se ustali pod jednom izabranom kombinacijom Sunca i atmosfere. Vreme se unutar simulacije i dalje menja iz dana u dan i iz godine u godinu, ali dugoročni proseci prestaju se znatnije pomicati.
To je korisno za pitanje „koja klima odgovara ovim uslovima?" Razlikuje se od predviđanja tačne putanje kojom stvarna Zemlja prelazi iz jednog skupa uslova u drugi.



Svaka pločica zasebno je izvođenje klimatskog modela ExoCAM tokom 70 modelskih godina, uz prosek poslednjih 20. Studija je uzorkovala 29 ustaljenih klima pri propisanim uslovima Sunčevog zračenja i ugljen-dioksida; nije simulirala jednu Zemlju koja se neprekidno razvija dve milijarde godina.

The Clean Paper CC BY 4.0

Granični slučaj jedan: dovoljno ugljen-dioksida, previše vrućine

U grani slabog trošenja ugljen-dioksid ostaje fiksiran na 400 delova na milion. Kako raste Sunčev dotok energije, ograničavajući faktor postaje toplota.

Rad koristi dva praga globalne srednje temperature preuzeta iz ranijih istraživanja:

- Pri **323 kelvina**, oko **50 stepeni Celzija** kao globalnom godišnjem proseku, svet se smatra prevrućim za većinu kopnenih biljaka. Model taj prag dostiže za oko **1,68 milijardi godina**.
- Pri **338 kelvina**, oko **65 stepeni Celzija** kao globalnom godišnjem proseku, svet se smatra prevrućim za sve kopnene biljke. Model taj prag dostiže za oko **1,87 milijardi godina**.

To su usvojene biološke granice, a ne univerzalne temperature pri kojima nužno otkazuje svaki fotosintetski organizam. Globalni prosek takođe skriva velike regionalne razlike. Studija zasebno ispituje gde bi kombinacije temperature i vode mogle ostati prikladne, ali oznaka na klimatskoj karti ne može popisati svako buduće utočište ili prilagodbu.

Granični slučaj dva: podnošljiva temperatura, premalo ugljen-dioksida

U grani snažnog trošenja globalna srednja temperatura održava se na 288 kelvina, oko 15 stepeni Celzija, dok atmosferski ugljen-dioksid pada. Ovde odgovor zavisi o tome koliko malo ugljenika mogu koristiti različiti fotosintetski putovi.

- Pri tradicionalnom pragu od **10 delova na milion** — 10 molekula ugljen-dioksida na svaki milion atmosferskih molekula — granica za C4 fotosintezu stiže za oko **1,35 milijardi godina**. C4 fotosintezu koriste biljke poput kukuruza i šećerne trske, a ona koncentrira ugljen-dioksid oko enzima koji ga veže.
- Ako se primeni alternativni prag od **2,9 delova na milion** za C4, o kojem se raspravlja u ranijim radovima, granica se pomera na oko **1,64 milijardi godina**.
- Okvirni prag od **1 dela na milion**, povezan s mogućim opstankom nekih CAM biljaka — biljaka koje koriste metabolizam kiselina tustikovki, pri kojem se unos ugljen-dioksida noću odvaja od njegove dnevne upotrebe — ili vodenih biljaka koje mogu koristiti rastvoreni bikarbonat, pomera granicu na oko **1,84 milijardi godina**.

Posljednja brojka nosi najveću biološku ogradu. Autori izričito nazivaju granicu od jednog dela na milion okvirnom. To nije eksperimentalno utvrđen prag preživljavanja za sve CAM biljke ili vodenu

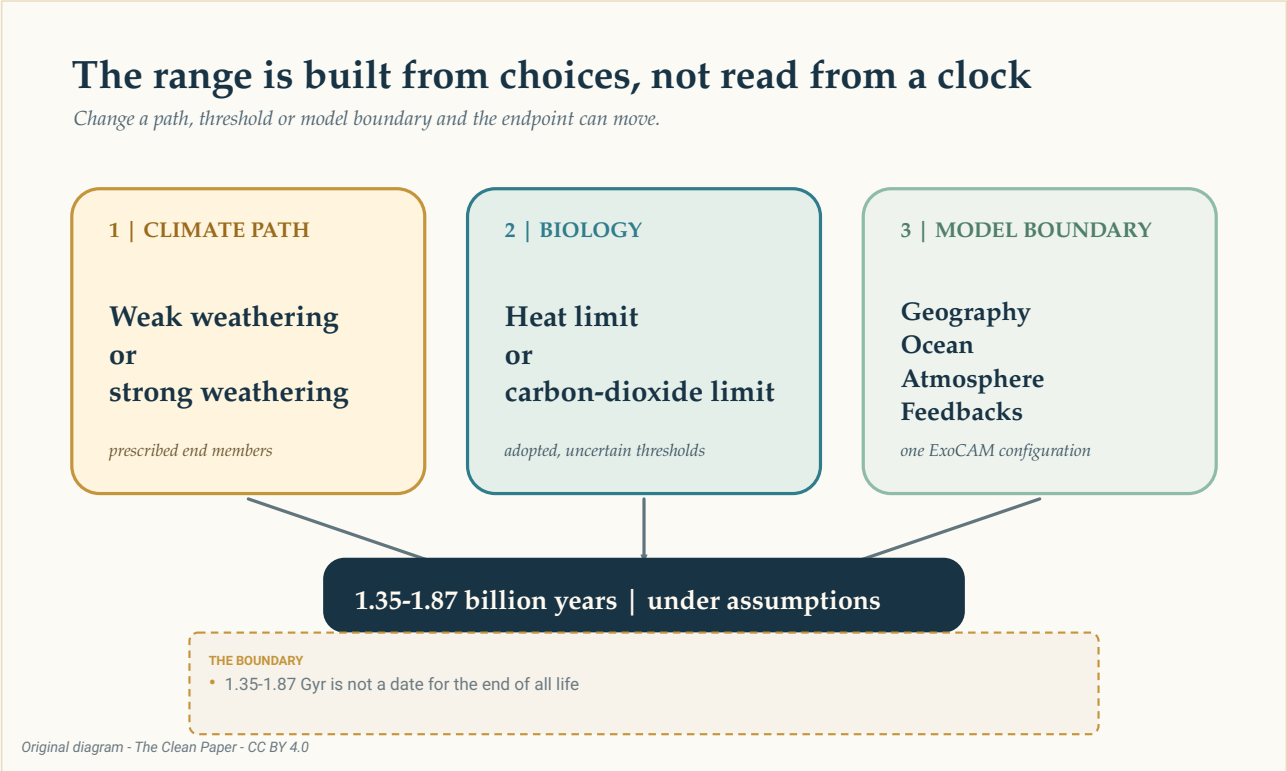
vegetaciju u uslovima buduće Zemlje.

> **C3, C4 i CAM su strategije, a ne ljestvica**
>
> Biljke koriste različite biohemijske putove za hvatanje ugljenika. **C3 fotosinteza** najčešća je. **C4 fotosinteza**, koju koriste biljke poput kukuruza i šećerne trske, koncentrira ugljen-dioksid oko enzima koji veže ugljenik i može bolje raditi kada je ugljen-dioksida malo. **Metabolizam kiselina tustikovki (CAM)** odvaja unos i upotrebu ugljenika između noći i dana, što mnogim biljkama pomaže štedjeti vodu.
> To su grupe strategija s mnogim razlikama među vrstama, a ne uzastopni stepeni „boljih" biljaka. Vrlo niski pragovi ugljen-dioksida u radu pretpostavke su za istraživanje mogućih granica, a ne garancija da će budući ekosistem evoluirati tako da ih može koristiti.

Zašto 1,86 milijardi godina nije datum isteka

Glavna procena u radu od oko **1,86 milijardi godina** prosek je dveju optimističnih gornjih granica: 1,84 milijardi godina u grani ograničenoj ugljenikovim dioksidom i 1,87 milijardi godina u grani ograničenoj toplotom. To je sažeta brojka za dva različita scenarija. Nije treći rezultat modela s većom preciznošću i nije datum najbolje procene.

Čak ni širi raspon od 1,35 do 1,87 milijardi godina nema jednu pripadajuću verovatnoća. Donja i gornja vrednost zavise o različitim pretpostavkama o trošenju stena, različitim biološkim pragovima i jednoj konfiguraciji klimatskog modela. Raspon meri izbore u eksperimentu jednako koliko meri vreme.



Raspon od 1,35 do 1,87 milijardi godina pojavljuje se tek nakon odabira putanje trošenja stena, biološkog praga i granica modela. To je karta pretpostavki, a ne sat koji odbrojava do izumiranja celokupnog života.

The Clean Paper CC BY 4.0

Druge granice mogu stići pre

Najduže procene trajanja vegetativne biosfere približavaju se zasebnoj i nesigurnoj granici: vlažnom ili nekontrolisanom stakleničkom efektu koji bi mogao podstaći velik gubitak okeana. Klimatski modeli znatno se razilaze oko toga kada takva stanja počinju pri rastućem Sunčevu zračenju, naročito daleko od današnjih uslova. Neke procene smeštaju ih pre najoptimističnije granice fotosinteze.

To znači da se gornja grana ne može čitati kao obećanje da će Zemlja zadržati okeane, poznate kontinente ili nastanjive površinske uslove sve do 1,87 milijardi godina od danas. Model takođe ne uključuje buduću tektoniku ploča, promene površine kopna, evoluciju ekosistema ni potpuno dinamičan okean. Izračuni načina na koji atmosfera apsorbira i emitira energiju takođe se guraju u režime snažnog Sunčevog zračenja i izuzetno malo ugljen-dioksida, gde se različiti modeli razilaze.

Evolucijska prilagodba i tehnološka intervencija pojavljuju se u raspravi rada kao mogućnosti. One nisu rezultati 29 klimatskih simulacija. Model ne pokazuje kako budući organizmi evoluiraju fotosintetski put sposoban raditi pri jednom delu na milion, niti pokazuje civilizaciju koja milijardu godina upravlja atmosferom.

Ovo nije rezultat o današnjoj klimatskoj krizi

Jačanje Sunčeva sjaja deluje tokom stotina miliona do milijardi godina. Današnje zagrevanje uzrokovano ljudskim delovanjem proizlazi iz brzog povećanja gasova staklene bašte tokom decenije i veka. To su različiti uzroci, na radikalno različitim vremenskim skalama, i odgovaraju na različita pitanja.

Ništa u ovoj studiji ne slabi dokaze o današnjim klimatskim promenama niti zagovara odgađanje delovanja. Biosfera koja bi u nekom dalekom modelskom scenariju mogla zadržati deo fotosintetskog života nije isto što i klima u kojoj su današnja društva i ekosistemi sigurni.

Rad je vredan jer udaljeno pitanje čini disciplinovanijim. Pokazuje da su raniji, jednostavniji modeli možda proizvodili previše zagrevanja kada je Sunčevo zračenje raslo uz fiksan ugljen-dioksid, te da fotosintetski život možda ima više puteva opstanka nego što sugeriše jedan kanonski prag ugljenika. Takođe pokazuje zašto svaka dodatna desetinka milijarde godina dolazi vezana uz lanac pretpostavki.

Sunce koje hrani list polako se menja. Hoće li Zemlja ostati zelena još 1,35, 1,87 ili neki drugi broj milijardi godina zavisiti će o zajedničkom odgovoru stena, vode, atmosfere i života. Pošten rezultat nije datum. To je širi pogled na taj kompromis.

Kratak rezime

Trodimenzionalna klimatska studija pita koliko bi dugo Zemljina vegetativna — fotosintetska — biosfera mogla opstati dok Sunce polako postaje sjajnije. Istraživači su izračunali 29 zasebnih stacionarnih klima i kroz njih pratili dva ilustrativna granična slučaja. Uz slabo trošenje i ugljen-dioksid fiksiran na 400 delova na milion, usvojene temperaturne granice za kopnene biljke pojavljuju se za oko 1,68 i 1,87 milijardi godina. Uz snažno trošenje i globalnu srednju temperaturu fiksiranu na 288 kelvina, oko 15 stepeni Celzija, usvojene granice ugljen-dioksida za fotosintezu pojavljuju se za oko 1,35, 1,64 i, uz okvirni prag, 1,84 milijardi godina. Često citiranih 1,86 milijardi godina samo je zaokruženi prosek dveju optimističnih gornjih granica. To su rasponi modela zavisni o scenariju, a ne datum kada će završiti Zemlja, čovečanstvo ili sav život. Model koristi propisane putanje, današnju geografiju, pojednostavljeni okean i nema izričito sprezanje tlo–vegetacija ni klima–trošenje stena, a najduže procene približavaju se nesigurnim granicama efekta staklene bašte i gubitka okeana.

Provera bez ulepšavanja

Šta rad pokazuje: U ovoj konfiguraciji ExoCAM-a trodimenzionalne klime uopšteno se zagrevaju manje pri rastućem Sunčevu zračenju i fiksnom ugljen-dioksidu nego pojednostavljeni modeli korišćeni za poređenje. Kroz dva propisana granična slučaja trošenja stena i nekoliko usvojenih bioloških pragova, granice vegetativne biosfere padaju između otprilike 1,35 i 1,87 milijardi godina od danas.

Šta je verovatno moguće, ali nije utvrđeno: Da bi neke CAM biljke ili vodene biljke koje koriste

rastvoreni bikarbonat mogle održavati fotosintezu blizu jednog dela na milion atmosferskog ugljen-dioksida; da bi prilagodba ili tehnologija mogle dodatno produžiti fotosintetski život; te da će stvarna putanja klime i trošenja stena ostati između dva granična slučaja modela.

Šta rad ne pokazuje: Fiksni datum kraja svih biljaka, celokupnog života, ljudske civilizacije, Zemljinih okeana ili planeta; jednu neprekinutu simulaciju sledeće dve milijarde godina; niti bilo kakav razlog za umanjivanje današnjih klimatskih promena uzrokovanih ljudskim delovanjem.

Glavna ograničenja: Dvadeset i devet stacionarnih slučajeva iz jedne porodice klimatskih modela; propisane, a ne dinamički povezane putanje trošenja stena; današnja geografija; pojednostavljeni okean; fiksni metan; nulti nagib osi i ekscentricitet; bez izričitog tla, vegetacije ili povratnih sprega biosfere; nesigurni temperaturni i ugljenik-dioksidni pragovi; te veliko neslaganje modela blizu uslova vlažnog i nekontrolisanog efekta staklene bašte.

Koliko poverenja treba da ima prosečan čitalac? Visoko poverenje da studija proširuje verodostojan raspon modela i identifikuje pretpostavke koje njime upravljaju. Umereno poverenje u brojčani raspon kao koristan okvir unutar ovog modela. Nisko poverenje u bilo koji tačan datum, jer najudaljenije krajnje tačke zavise o namerno ekstremnim klimatskim putanjama i nesigurnoj biologiji.

Izvori

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