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. Vrijednosti ovise o namjerno pojednostavljenim putanjama trošenja stijena, zagrijavanja i najnižim razinama ugljikova dioksida koje bi biljke mogle koristiti. One ne predviđaju kada će nestati sve biljke, sav život, civilizacija ili sam 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

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

List opstaje unutar uskog kompromisa. Treba svjetlost, vodu, ugljikov dioksid i temperaturu koju njegova kemija može podnijeti. Tijekom ljudskog života Sunce se čini kao nepromjenjivi dio tog kompromisa. Tijekom milijarde godina nije.

Kako Sunce stari na glavnom nizu, polako postaje sjajnije. Više Sunčeve svjetlosti zagrijava Zemlju, ali planet ima dugoročan odgovor: reakcije između kišnice, ugljikova dioksida i silikatnih stijena mogu uklanjati ugljikov dioksid iz atmosfere. Time se slabi efekt staklenika i ublažava dio zagrijavanja. No isti odgovor koji hladi planet naposljetku može fotosintetskim organizmima oduzeti ugljik kojim grade živo tkivo.

Novi rad u časopisu Journal of Geophysical Research: Atmospheres pita koja bi granica mogla stići prva: prevelika vrućina ili premalo ugljikova dioksida. Odgovor nije datum kada Zemlja umire. U dvije namjerno 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**: dio Zemljina živog sustava koji održavaju fotosintetski organizmi, osobito biljke i drugi oblici života koji svjetlost i ugljikov dioksid pretvaraju u biološki materijal. To nije prognoza za svaki mikrob. Nije životni vijek ljudske civilizacije. Nije životni vijek planeta.

Planetarni termostat ima dvije nesigurne postavke

Središnja neizvjesnost je **trošenje silikatnih stijena**. Ugljikov dioksid otapa se u kišnici, reagira sa silikatnim stijenama i naposljetku se prenosi prema oceanima i sedimentima. Vulkani tijekom geoloških razdoblja vraćaju ugljikov dioksid. Ti procesi zajedno čine dio karbonatno-silikatnog ciklusa, koji se često opisuje kao planetarni termostat.

U toplijem i vlažnijem svijetu trošenje stijena može se ubrzati i brže uklanjati ugljikov dioksid. No znanstvenici ne znaju koliko će snažno taj odgovor upravljati Zemljom pod budućim sjajnijim Suncem. Jacob Haqq-Misra i Eric Wolf zato nisu odabrali jednu navodno ispravnu putanju. Modelirali su dva **granična slučaja**: namjerno ekstremne scenarije koji omeđuju neizvjesnost.

- U **graničnom slučaju slabog trošenja**, atmosferski ugljikov dioksid ostaje na 400 dijelova na milijun, dok sve sjajnije Sunce podiže temperaturu.
- U **graničnom slučaju snažnog trošenja**, globalna srednja površinska temperatura ostaje na 288 kelvina, oko 15 stupnjeva Celzija, dok se s porastom Sunčeva zračenja količina ugljikova dioksida smanjuje.

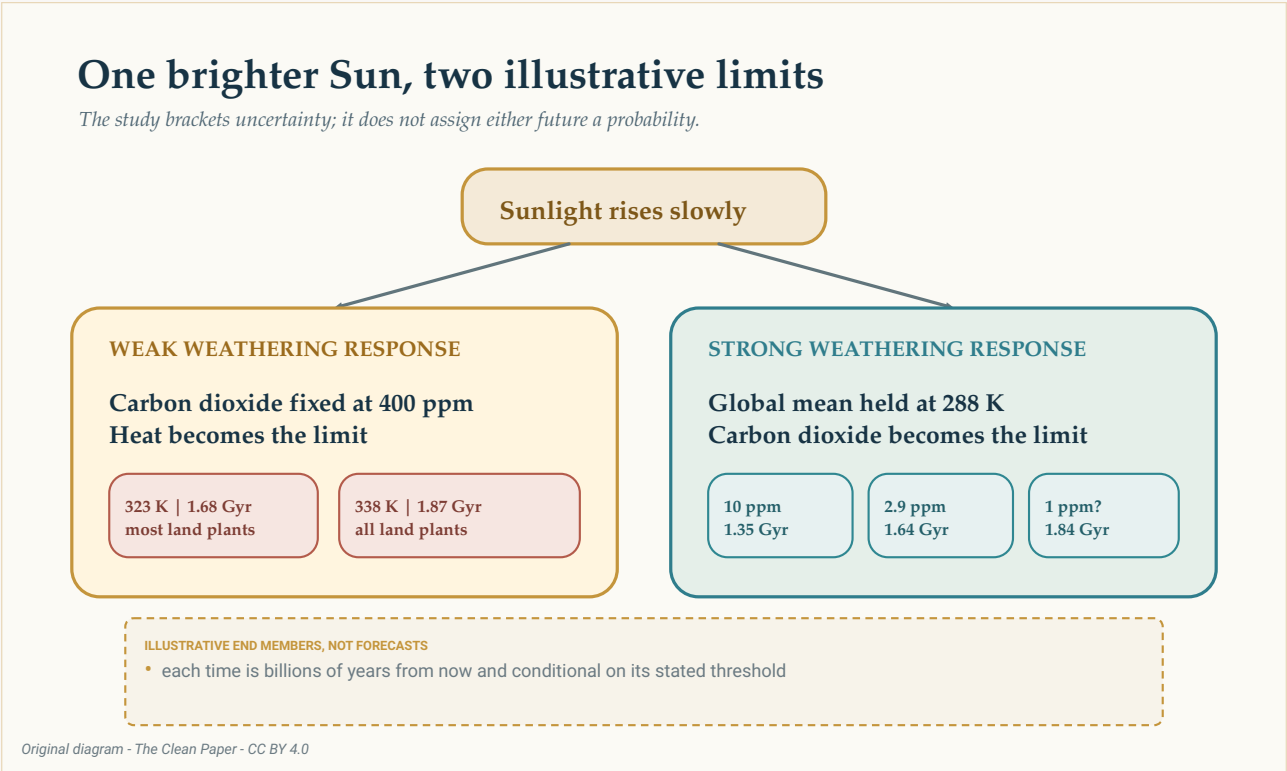
Nijedna grana nije predstavljena kao stvarna Zemljina budućnost. Prva pita što bi učinila vrućina kada bi ugljikov dioksid ostao visok. Druga pita što bi učinio nedostatak ugljika kada bi trošenje stijena

održavalo globalnu temperaturu blizu današnjeg prosjeka.

Kako trošenje stijena može djelovati poput termostata?

Analogija se odnosi na povratnu spregu, a ne na doslovni regulator. Kada toplija klima ubrza kemijsko trošenje, više atmosferskog ugljikova dioksida može završiti u otopljenim tvarima, mineralima i sedimentima. Uklanjanje tog stakleničkog plina suprotstavlja se dijelu početnog zagrijavanja. Na vrlo dugim vremenskim skalama vulkansko otplinjavanje vraća ugljikov dioksid.

Snaga svake karike ovisi o oborinama, izloženim stijenama, eroziji, biologiji, tektonici i kemiji oceana. Zato rad ispituje granične odzive umjesto da termostat tretira kao poznat stroj.



Rad omeđuje neizvjesnu budućnost s dva ilustrativna granična slučaja. Ako trošenje reagira slabo, rastuća vrućina doseže usvojene temperaturne pragove za kopnene biljke. Ako reagira snažno, pad ugljikova dioksida doseže usvojene pragove fotosinteze. To su uvjetne grane modela, a ne vjerojatnosti ili datumi odbrojavanja.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dvadeset i devet ustaljenih modelskih svjetova, a ne jedan film od dvije milijarde godina

Istraživači su upotrijebili ExoCAM, trodimenzionalni globalni klimatski model, kako bi izračunali **29 stacionarnih klima** za različite kombinacije jačeg Sunčeva zračenja i nižeg ugljikova dioksida. Svaki slučaj izvođen je 70 modelskih godina. Ovdje jedna modelska godina znači jedan simulirani godišnji ciklus pri fiksnim uvjetima: to je vrijeme izvođenja potrebno da se umjetna 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 prosjek posljednjih 20 godina.

Tih 29 slučajeva zasebni su modelski svjetovi. Svako izvođenje jedna je točka u mreži koja odgovara na pitanje: „Koja se ustaljena klima uklapa u ovu odabranu kombinaciju Sunčeva zračenja i ugljikova dioksida?" Računalo nije krenulo od današnje Zemlje i zatim neprekidno razvijalo njezinu atmosferu, stijene, oceane i živi svijet tijekom sljedeće dvije milijarde godina. Autori su umjesto toga kroz te unaprijed izračunate točke pratili dvije shematske putanje trošenja; sama putanja između točaka nije simulirana.

Tablica reproducira kombinacije Sunčeva zračenja i ugljikova dioksida iz službene arhive podataka modela. ID-jevi slučajeva ovdje su dodani kao pomoć pri čitanju, redoslijedom iz arhive. **S/S0** je relativna Sunčeva konstanta: ulazna Sunčeva energija korištena u modelu podijeljena s današnjom vrijednošću, S0. Vrijednost 1,2 stoga znači 20 posto više ulazne Sunčeve energije nego danas. **CO2 (ppm)** je omjer miješanja atmosferskog ugljikova dioksida, izražen brojem molekula na milijun atmosferskih molekula.

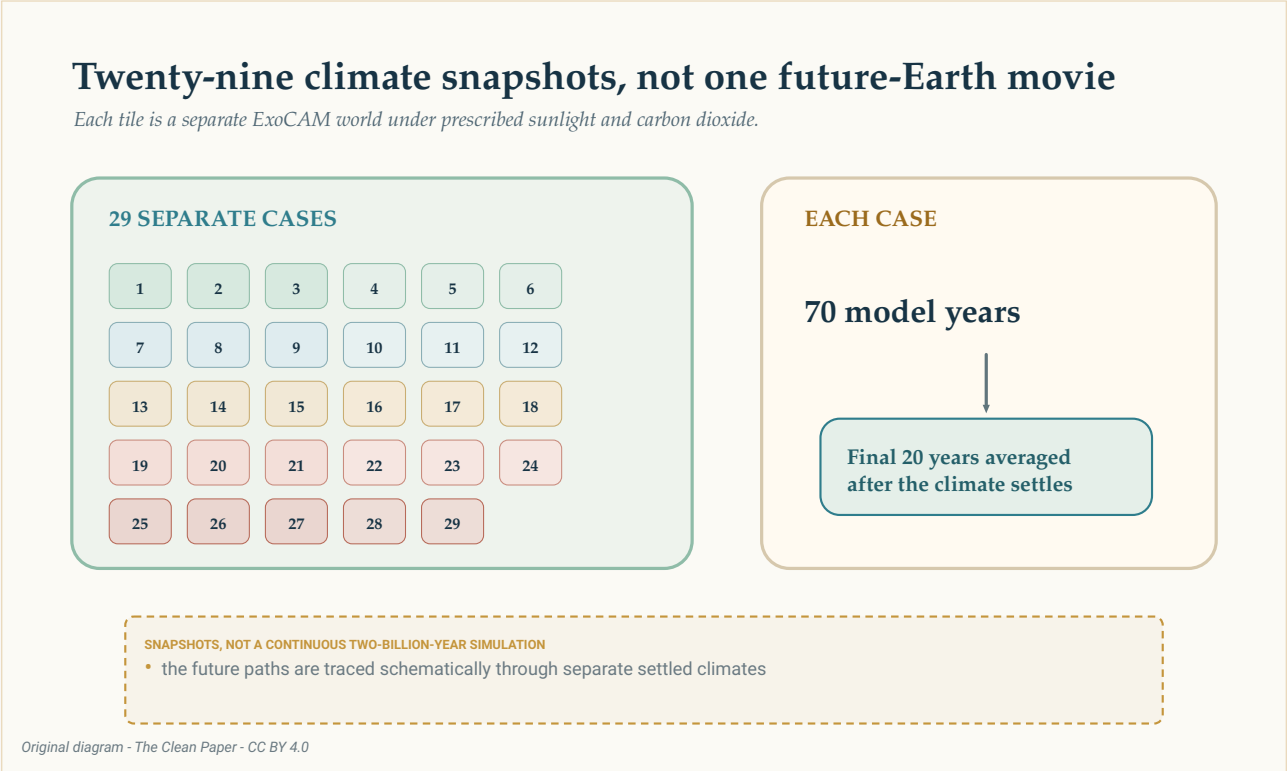
ID slučaja	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

ID slučaja	S/S0	CO2 (ppm)
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

Modelska Zemlja prepoznatljiva je, ali namjerno ograničena. Veličine je Zemlje i koristi današnju geografiju. Ima pojednostavljeni ocean bez pune oceanske cirkulacije, atmosferski tlak postavljen približno na današnju Zemljinu vrijednost (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 promjenjive biosfere. Najvažnije, klimatski model nije dinamički spojen s modelom trošenja stijena. Drugim riječima, ExoCAM ne izračunava trošenje, koristi ga za ažuriranje ugljikova dioksida i zatim pokreće sljedeću klimu u petlji povratne sprege. Istraživači su umjesto toga zadali dvije granične putanje i pratili ih kroz mrežu od 29 klimatskih slučajeva.

Što „stacionarno stanje" znači u klimatskom modelu?

Slučaj stacionarnog stanja jest modelska klima kojoj je dopušteno da se ustali pod jednom odabranom kombinacijom Sunca i atmosfere. Vrijeme se unutar simulacije i dalje mijenja iz dana u dan i iz godine u godinu, ali dugoročni prosjeci prestaju se znatnije pomicati.
To je korisno za pitanje „koja klima odgovara ovim uvjetima?" Razlikuje se od predviđanja točne putanje kojom stvarna Zemlja prelazi iz jednog skupa uvjeta u drugi.



Svaka pločica zasebno je izvođenje klimatskog modela ExoCAM tijekom 70 modelskih godina, uz prosjek posljednjih 20. Studija je uzorkovala 29 ustaljenih klima pri propisanim uvjetima Sunčeva zračenja i ugljikova dioksida; nije simulirala jednu Zemlju koja se neprekidno razvija dvije milijarde godina.

The Clean Paper CC BY 4.0

Granični slučaj jedan: dovoljno ugljikova dioksida, previše vrućine

U grani slabog trošenja ugljikov dioksid ostaje fiksiran na 400 dijelova na milijun. Kako raste Sunčev dotok energije, ograničavajući čimbenik postaje toplina.

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

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

To su usvojene biološke granice, a ne univerzalne temperature pri kojima nužno otkazuje svaki fotosintetski organizam. Globalni prosjek također skriva velike regionalne razlike. Studija zasebno ispituje gdje 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 ugljikova dioksida

U grani snažnog trošenja globalna srednja temperatura održava se na 288 kelvina, oko 15 stupnjeva Celzija, dok atmosferski ugljikov dioksid pada. Ovdje odgovor ovisi o tome koliko malo ugljika mogu koristiti različiti fotosintetski putovi.

- Pri tradicionalnom pragu od **10 dijelova na milijun** — 10 molekula ugljikova dioksida na svaki milijun 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 ugljikov dioksid oko enzima koji ga veže.
- Ako se primijeni alternativni prag od **2,9 dijelova na milijun** za C4, o kojem se raspravlja u ranijim radovima, granica se pomiče na oko **1,64 milijardi godina**.
- Okvirni prag od **1 dijela na milijun**, povezan s mogućim opstankom nekih CAM biljaka — biljaka koje koriste metabolizam kiselina tustikovki, pri kojem se unos ugljikova dioksida noću odvaja od njegove dnevne uporabe — ili vodenih biljaka koje mogu koristiti otopljeni bikarbonat, pomiče granicu na oko **1,84 milijardi godina**.

Posljednja brojka nosi najveću biološku ogradu. Autori izričito nazivaju granicu od jednog dijela na milijun okvirnom. To nije eksperimentalno utvrđen prag preživljavanja za sve CAM biljke ili vodenu vegetaciju u uvjetima buduće Zemlje.

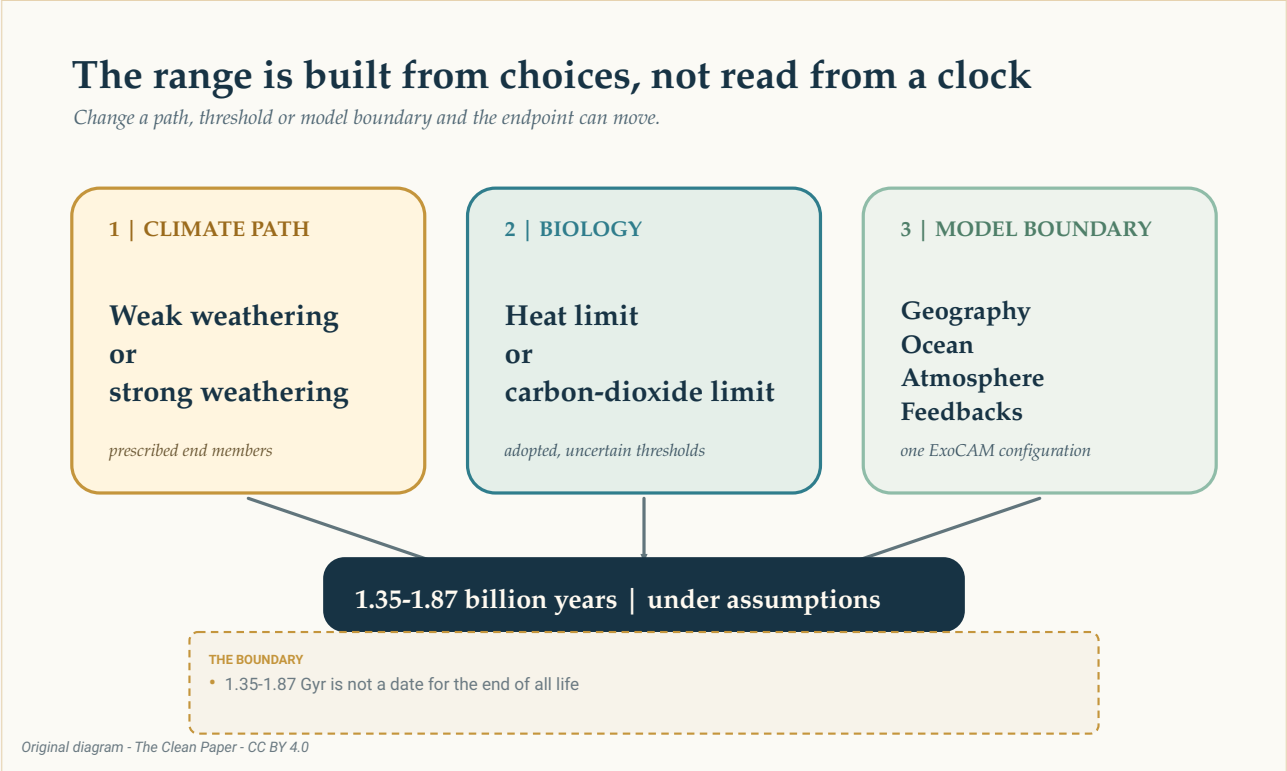
> **C3, C4 i CAM su strategije, a ne ljestvica**
>
> Biljke koriste različite biokemijske putove za hvatanje ugljika. **C3 fotosinteza** najčešća je. **C4 fotosinteza**, koju koriste biljke poput kukuruza i šećerne trske, koncentrira ugljikov dioksid oko enzima koji veže ugljik i može bolje raditi kada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

Zašto 1,86 milijardi godina nije datum isteka

Glavna procjena u radu od oko **1,86 milijardi godina** prosjek je dviju optimističnih gornjih granica: 1,84 milijardi godina u grani ograničenoj ugljikovim dioksidom i 1,87 milijardi godina u grani ograničenoj toplinom. To je sažeta brojka za dva različita scenarija. Nije treći rezultat modela s većom preciznošću i nije datum najbolje procjene.

Čak ni širi raspon od 1,35 do 1,87 milijardi godina nema jednu pripadajuću vjerojatnost. Donja i gornja vrijednost ovise o različitim pretpostavkama o trošenju stijena, različitim biološkim pragov-

ima i jednoj konfiguraciji klimatskog modela. Raspon mjeri izbore u eksperimentu jednako koliko mjeri vrijeme.



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

The Clean Paper CC BY 4.0

Druge granice mogu stići prije

Najdulje procjene trajanja vegetativne biosfere približavaju se zasebnoj i nesigurnoj granici: vlažnom ili nekontroliranom stakleničkom efektu koji bi mogao potaknuti velik gubitak oceana. Klimatski modeli znatno se razilaze oko toga kada takva stanja počinju pri rastućem Sunčevu zračenju, osobito daleko od današnjih uvjeta. Neke procjene smještaju ih prije najoptimističnije granice fotosinteze.

To znači da se gornja grana ne može čitati kao obećanje da će Zemlja zadržati oceane, poznate kontinente ili nastanjive površinske uvjete sve do 1,87 milijardi godina od danas. Model također ne uključuje buduću tektoniku ploča, promjene površine kopna, evoluciju ekosustava ni potpuno dinamičan ocean. Izračuni načina na koji atmosfera apsorbira i emitira energiju također se guraju u režime snažnog Sunčeva zračenja i iznimno malo ugljikova dioksida, gdje 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 dijelu na milijun, niti pokazuje civilizaciju koja milijardu godina upravlja atmosferom.

Ovo nije rezultat o današnjoj klimatskoj krizi

Jačanje Sunčeva sjaja djeluje tijekom stotina milijuna do milijardi godina. Današnje zagrijavanje uzrokovano ljudskim djelovanjem proizlazi iz brzog povećanja stakleničkih plinova tijekom desetljeća i stoljeća. To su različiti uzroci, na radikalno različitim vremenskim skalama, i odgovaraju na različita pitanja.

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

Rad je vrijedan jer udaljeno pitanje čini disciplinirani jim. Pokazuje da su raniji, jednostavniji modeli možda proizvodili previše zagrijavanja kada je Sunčevo zračenje raslo uz fiksan ugljikov dioksid, te da fotosintetski život možda ima više putova opstanka nego što sugerira jedan kanonski prag ugljika. Također pokazuje zašto svaka dodatna desetinka milijarde godina dolazi vezana uz lanac pretpostavki.

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

Ukratko

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 ugljikov dioksid fiksiran na 400 dijelova na milijun, 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 stupnjeva Celzija, usvojene granice ugljikova 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 prosjek dviju optimističnih gornjih granica. To su rasponi modela ovisni o scenariju, a ne datum kada će završiti Zemlja, čovječanstvo ili sav život. Model koristi propisane putanje, današnju geografiju, pojednostavljeni ocean i nema izričito sprezanje tlo–vegetacija ni klima–trošenje stijena, a najdulje procjene približavaju se nesigurnim granicama stakleničkog efekta i gubitka oceana.

Provjera bez uljepšavanja

Što rad pokazuje: U ovoj konfiguraciji ExoCAM-a trodimenzionalne klime općenito se zagrijavaju manje pri rastućem Sunčevu zračenju i fiksnom ugljikovu dioksidu nego pojednostavljeni modeli korišteni za usporedbu. Kroz dva propisana granična slučaja trošenja stijena i nekoliko usvojenih

bioloških pragova, granice vegetativne biosfere padaju između otprilike 1,35 i 1,87 milijardi godina od danas.

Što je vjerojatno moguće, ali nije utvrđeno: Da bi neke CAM biljke ili vodene biljke koje koriste otopljeni bikarbonat mogle održavati fotosintezu blizu jednog dijela na milijun atmosferskog ugljikova dioksida; da bi prilagodba ili tehnologija mogle dodatno produljiti fotosintetski život; te da će stvarna putanja klime i trošenja stijena ostati između dva granična slučaja modela.

Što rad ne pokazuje: Fiksni datum kraja svih biljaka, cjelokupnog života, ljudske civilizacije, Zemljinih oceana ili planeta; jednu neprekinutu simulaciju sljedeće dvije milijarde godina; niti bilo kakav razlog za umanjivanje današnjih klimatskih promjena uzrokovanih ljudskim djelovanjem.

Glavna ograničenja: Dvadeset i devet stacionarnih slučajeva iz jedne obitelji klimatskih modela; propisane, a ne dinamički povezane putanje trošenja stijena; današnja geografija; pojednostavljeni ocean; fiksni metan; nulti nagib osi i ekscentricitet; bez izričitog tla, vegetacije ili povratnih sprega biosfere; nesigurni temperaturni i ugljik-dioksidni pragovi; te veliko neslaganje modela blizu uvjeta vlažnog i nekontroliranog stakleničkog efekta.

Koliko povjerenja treba imati opći čitatelj? Visoko povjerenje da studija proširuje vjerodostojan raspon modela i identificira pretpostavke koje njime upravljaju. Umjereno povjerenje u brojčani raspon kao koristan okvir unutar ovog modela. Nisko povjerenje u bilo koji točan datum, jer najudaljenije krajnje točke ovise o namjerno 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