The Clean Paper

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

Sa gjatë mund të mbetet Toka e gjelbër? Një model klimatik jep intervale, jo një datë apokalipsi

Njëzet e nëntë simulime klimatike tredimensionale vendosin kufij të ndryshëm për biosferën fotosintetike të Tokës midis afërsisht 1,35 dhe 1,87 miliardë vjet nga tani. Vlerat varen nga rrugë të thjeshtuara qëllimisht për alterimin e shkëmbinjve, nxehtësinë dhe nivelet më të ulëta të dioksidit të karbonit që bimët mund të përdorin. Ato nuk parashikojnë kur do të përfundojnë të gjitha bimët, e gjithë jeta, qytetërimi ose planeti.

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

Sa gjatë mund të mbetet Toka e gjelbër? Një model klimatik jep intervale, jo një datë apokalipsi

Një gjethe jeton brenda një kompromisi të ngushtë. Ajo ka nevojë për dritë, ujë, dioksid karboni dhe një temperaturë që kimia e saj mund ta përballojë. Gjatë një jete njerëzore, Dielli duket si pjesa e pandryshueshme e këtij kompromisi. Gjatë një miliard vjetësh, nuk është.

Ndërsa Dielli plaket në sekuencën kryesore, ai bëhet ngadalë më i ndritshëm. Më shumë dritë diellore e ngroh Tokën, por planeti ka një përgjigje afatgjatë: reaksionet midis ujit të shiut, dioksidit të karbonit dhe shkëmbinjve silikatikë mund të heqin dioksid karboni nga atmosfera. Kjo dobëson efektin serrë dhe kompenson një pjesë të ngrohjes. E njëjta përgjigje që e ftoh planetin mund t'i privojë përfundimisht organizmat fotosintetikë nga karboni që përdorin për të ndërtuar inde të gjalla.

Një punim i ri në Journal of Geophysical Research: Atmospheres pyet cili kufi mund të mbërrijë i pari: shumë nxehtësi apo shumë pak dioksid karboni. Përgjigjja nuk është një datë kur Toka vdes. Në dy rrugë të së ardhmes të thjeshtuara qëllimisht, kufijtë e zgjedhur për jetën fotosintetike bien midis afërsisht **1,35 dhe 1,87 miliardë vjet nga tani**.

Ky interval ka të bëjë me **biosferën vegjetative**: pjesën e sistemit të gjallë të Tokës që mbahet nga organizmat fotosintetikë, veçanërisht bimët dhe forma të tjera jete që kthejnë dritën dhe dioksidin e karbonit në material biologjik. Nuk është një parashikim për çdo mikrob. Nuk është jetëgjatësia e qytetërimit njerëzor. Nuk është jetëgjatësia e planetit.

Termostati planetar ka dy rregullime të pasigurta

Pasiguria qendrore është **alterimi i silikateve**. Dioksidi i karbonit tretet në ujin e shiut, reagon me shkëmbinjtë silikatikë dhe përfundimisht transportohet drejt oqeaneve dhe sedimenteve. Vullkanet e rikthejnë dioksidin e karbonit gjatë kohës gjeologjike. Së bashku, këto procese formojnë një pjesë të ciklit karbonat-silikat, që shpesh përshkruhet si një termostat planetar.

Në një botë më të ngrohtë dhe më të lagësht, alterimi mund të përshpejtohet dhe të heqë dioksid karboni më shpejt. Por shkencëtarët nuk e dinë sa fort do ta kontrollojë kjo përgjigje Tokën nën një Diell të ardhshëm më të ndritshëm. Jacob Haqq-Misra dhe Eric Wolf prandaj nuk zgjodhën një rrugë të vetme gjoja të saktë. Ata modeluan dy **raste kufitare**: raste qëllimisht ekstreme, të përdorura për të kufizuar pasigurinë.

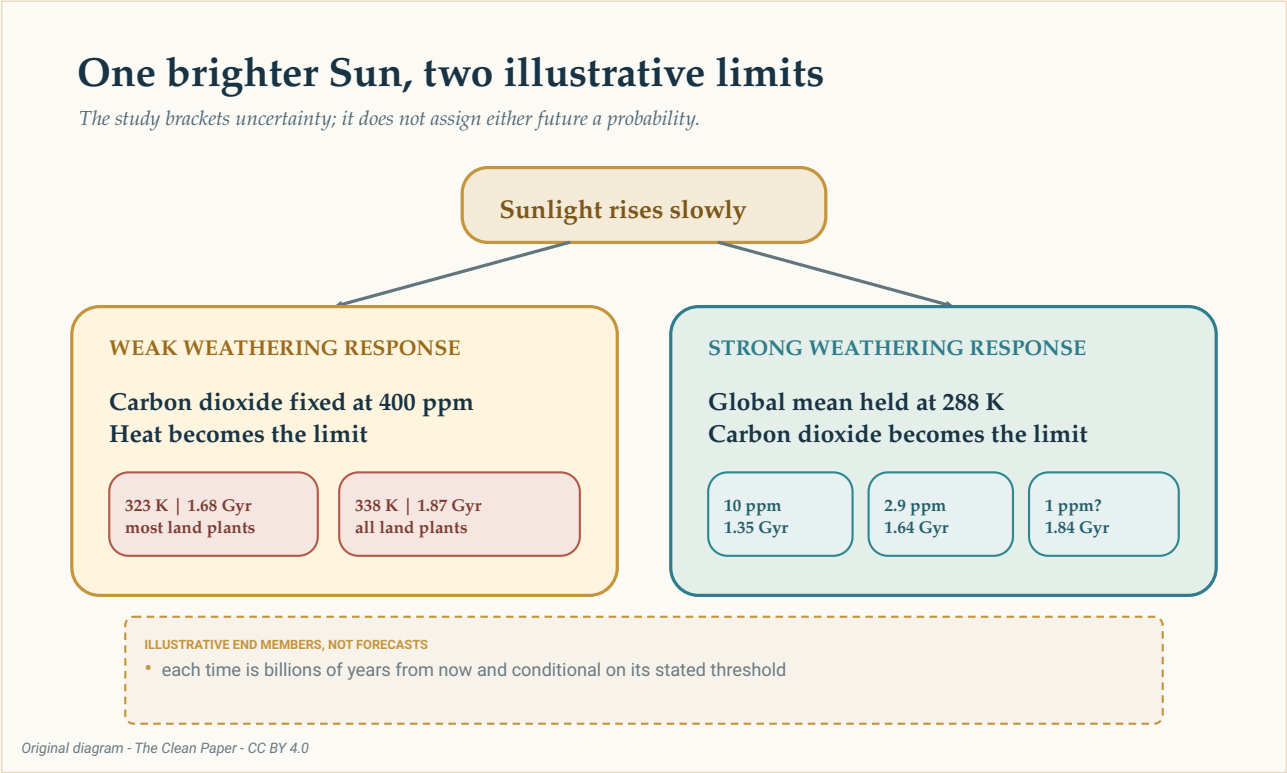
- Në **rastin kufitar me alterim të dobët**, dioksidi i karbonit atmosferik mbetet në 400 pjesë për milion ndërsa Dielli që ndriçon më shumë e rrit temperaturën.
- Në **rastin kufitar me alterim të fortë**, temperatura mesatare globale e sipërfaqes mbetet në 288 kelvin, rreth 15 gradë Celsius, ndërsa dioksidi i karbonit zvogëlohet me rritjen e rrezatimit diellor.

Asnjëra degë nuk paraqitet si e ardhmja reale e Tokës. E para pyet çfarë do të bënte nxehtësia nëse dioksidi i karbonit do të mbetej i lartë. E dyta pyet çfarë do të bënte uria për karbon nëse alterimi do

ta mbante temperaturën globale pranë mesatares së sotme.

Si mund të veprojë alterimi si termostat?

Analogjia ka të bëjë me feedback-un, jo me një çelës kontrolli të mirëfilltë. Kur një klimë më e ngrohtë përshpejton alterimin kimik, më shumë dioksid karboni atmosferik mund të përfundojë në materiale të tretura, minerale dhe sedimente. Heqja e këtij gazi serrë kundërshton një pjesë të ngrohjes fillestare. Në shkallë kohore shumë të gjata, degazimi vullkanik e rikthen dioksidin e karbonit.
Forca e secilës hallkë varet nga reshjet, shkëmbi i ekspozuar, erozioni, biologjia, tektonika dhe kimia e oqeanit. Prandaj punimi teston përgjigje kufizuese në vend që ta trajtojë termostatin si një makinë të njohur.



Punimi e kufizon një të ardhme të pasigurt me dy raste kufitare ilustruese. Nëse alterimi përgjigjet dobët, rritja e nxehtësisë arrin pragjet e zgjedhura për bimët tokësore. Nëse përgjigjet fort, rënia e dioksidit të karbonit arrin pragjet e zgjedhura të fotosintezës. Këto janë degë të kushtëzuara të modelit, jo probabilitete apo data të një numërimi mbrapsht.

The Clean Paper CC BY 4.0

Njëzet e nëntë botë-model të stabilizuara, jo një film dy-miliardë-vjeçar

Studiuesit përdorën ExoCAM, një model klimatik global tredimensional, për të llogaritur **29 klima në gjendje të qëndrueshme** në kombinime të rrezatimit diellor më të fortë dhe dioksidit të karbonit më të ulët. Secili rast u ekzekutua për 70 vite të modelit. Këtu, një vit i modelit është një cikël vjetor i simuluar nën kushte fikse: është kohë ekzekutimi e përdorur për ta lënë klimën artificiale të stabilizohet, jo një hap në një parashikim vit pas viti të së ardhmes së Tokës. 20 vitet e fundit u mesatarizuan pasi klima e simuluar pati kohë të stabilizohej.

Këto 29 raste janë botë-model të veçanta. Çdo ekzekutim është një pikë në një rrjet dhe i përgjigjet pyetjes: "çfarë klime e stabilizuar përputhet me këtë çift të zgjedhur të rrezatimit diellor dhe dioksidit të karbonit?" Kompjuteri nuk filloi me Tokën e sotme dhe nuk evoluoi vazhdimisht atmosferën, shkëmbinjtë, oqeanet dhe qeniet e saj të gjalla gjatë dy miliardë viteve të ardhshme. Në vend të kësaj, autorët gjurmuan dy rrugët skematike të alterimit përmes këtyre pikave të parallogaritura; vetë rruga midis pikave nuk u simulua.

Tabela riprodhon kombinimet e rrezatimit diellor dhe dioksidit të karbonit në arkivin zyrtar të të dhënave të modelit. ID-të e rasteve janë ndihmë për leximin e shtuar këtu sipas rendit të arkivit. **S/S0** është konstanta relative diellore: energjia diellore hyrëse e përdorur në model e pjesëtuar me vlerën e saj të sotme, S0. Prandaj, një vlerë 1,2 do të thotë 20 për qind më shumë energji diellore hyrëse se sot. **CO2 (ppm)** është raporti i përzierjes së dioksidit të karbonit atmosferik, në molekula për një milion molekula atmosferike.

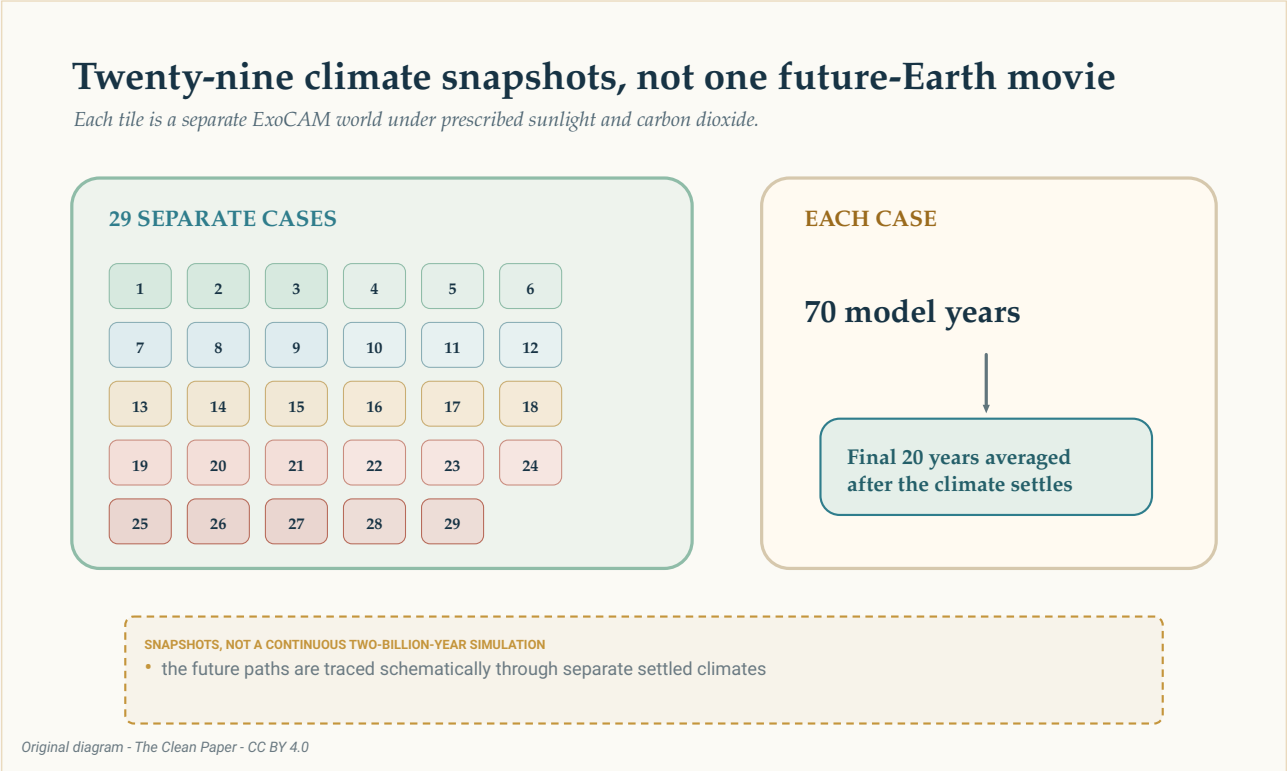
ID e rastit	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

ID e rastit	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

Toka e modelit është e dallueshme, por qëllimisht e kufizuar. Ka madhësinë e Tokës dhe përdor gjeografinë e sotme. Ka një oqean të thjeshtuar të tipit slab në vend të një oqeani me qarkullim të plotë, presion atmosferik të vendosur afërsisht në vlerën e sotme të Tokës (një bar), dhe metan të fiksuar. Orbita e saj është krejtësisht rrethore (ekscentricitet zero), dhe boshti i rrotullimit nuk ka pjerrësi (obliquitet zero). Nuk përmban toka, bimësi ose feedback të shprehur nga një biosferë që ndryshon. Më e rëndësishmja, modeli klimatik nuk është i lidhur dinamikisht me një model të alterimit të shkëmbinjve. Me fjalë të tjera, ExoCAM nuk llogarit alterimin, nuk e përdor për të përditë-suar dioksidin e karbonit dhe pastaj të ekzekutojë klimën tjetër në një lak feedback-u. Studiuesit përcaktuan në vend të kësaj dy rrugët kufizuese dhe i gjurmuan përmes rrjetit klimatik me 29 raste.

Çfarë do të thotë "gjendje e qëndrueshme" në një model klimatik?

Një rast në gjendje të qëndrueshme është një klimë modeli që lihet të stabilizohet nën një Diell dhe atmosferë të zgjedhur. Moti vazhdon të ndryshojë nga dita në ditë dhe nga viti në vit brenda simulimit, por mesataret e tij afatgjata ndalojnë së ndryshuari fort.
Kjo është e dobishme për të pyetur "çfarë klime përputhet me këto kushte?" Është ndryshe nga parashikimi i rrugës së saktë me të cilën Toka reale kalon nga një grup kushtesh në tjetrin.



Çdo pllakë është një ekzekutim i veçantë klimatik ExoCAM për 70 vite të modelit, me 20 vitet e fundit të mesatarizuara. Studimi kampionoi 29 klima të stabilizuara në kushte të përcaktuara të rrezatimit diellor dhe dioksidit të karbonit; ai nuk simuloi një Tokë të vetme që evoluon vazhdimisht për dy miliardë vjet.

The Clean Paper CC BY 4.0

Rasti kufitar një: mjaft dioksid karboni, shumë nxehtësi

Në degën me alterim të dobët, dioksidi i karbonit mbetet i fiksuar në 400 pjesë për milion. Ndërsa rritet energjia diellore hyrëse, nxehtësia bëhet faktori kufizues.

Punimi përdor dy pragje të temperaturës mesatare globale, të marra nga punime të mëparshme:

- Në **323 kelvin**, rreth **50 gradë Celsius** si mesatare vjetore globale, bota trajtohet si tepër e nxehtë për shumicën e bimëve tokësore. Modeli e arrin këtë prag pas rreth **1,68 miliardë vjetësh**.
- Në **338 kelvin**, rreth **65 gradë Celsius** si mesatare vjetore globale, bota trajtohet si tepër e nxehtë për të gjitha bimët tokësore. Modeli e arrin këtë prag pas rreth **1,87 miliardë vjetësh**.

Këto janë kufij biologjikë të zgjedhur, jo temperatura universale në të cilat çdo organizëm fotosintetik domosdoshmërisht dështon. Një mesatare globale fsheh gjithashtu dallime të mëdha rajonale. Studimi shqyrton veçmas se ku kombinimet e temperaturës dhe ujit mund të mbeten të përshtatshme, por një etiketë në një hartë klimatike nuk mund të katalogojë çdo strehë ose përshtatje të ardhshme.

Rasti kufitar dy: temperaturë e tolerueshme, shumë pak dioksid karboni

Në degën me alterim të fortë, temperatura mesatare globale mbahet në 288 kelvin, rreth 15 gradë Celsius, ndërsa dioksidi i karbonit atmosferik bie. Këtu përgjigjja varet nga sa pak karbon mund të përdorin rrugë të ndryshme fotosintetike.

- Në pragun tradicional prej **10 pjesësh për milion** — 10 molekula dioksid karboni për çdo milion molekula atmosferike — kufiri për fotosintezën C4 arrin pas rreth **1,35 miliardë vjetësh**. Fotosinteza C4 përdoret nga bimë përfshirë misrin dhe kallamin e sheqerit dhe përqendron dioksidin e karbonit rreth enzimës që e fikson atë.
- Përdorimi i një pragu alternativ C4 prej **2,9 pjesësh për milion**, të diskutuar në punime të mëparshme, e zhvendos kufirin në rreth **1,64 miliardë vjet**.
- Një prag i përkohshëm prej **1 pjese për milion**, i lidhur me vazhdimësinë e mundshme të disa bimëve CAM — bimë që përdorin metabolizmin acid të krasulaceve, i cili ndan marrjen e dioksidit të karbonit gjatë natës nga përdorimi i tij gjatë ditës — ose të bimëve ujore që mund të përdorin bikarbonat të tretur, e zhvendos kufirin në rreth **1,84 miliardë vjet**.

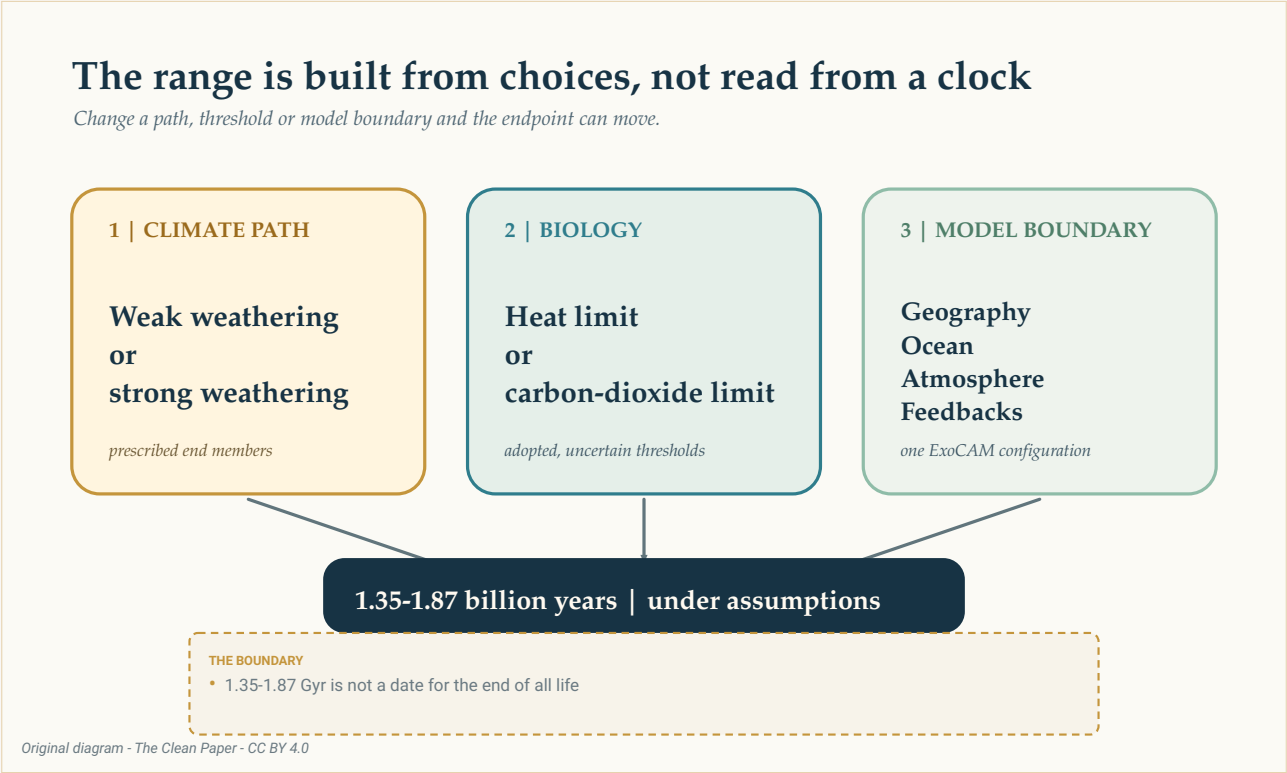
Numri i fundit mbart rezervën më të madhe biologjike. Autorët e quajnë shprehimisht të përkohshëm kufirin prej një pjese për milion. Ai nuk është një prag mbijetese i vendosur eksperimentalisht për të gjitha bimët CAM ose bimësinë ujore nën kushtet e Tokës së ardhshme.

> **C3, C4 dhe CAM janë strategji, jo një shkallë hierarkike**
>
> Bimët përdorin rrugë të ndryshme biokimike për të kapur karbonin. **Fotosinteza C3** është më e zakonshmja. **Fotosinteza C4**, e përdorur nga bimë përfshirë misrin dhe kallamin e sheqerit, përqendron dioksidin e karbonit rreth enzimës që fikson karbonin dhe mund të funksionojë më mirë kur dioksidi i karbonit është i pakët. **Metabolizmi acid i krasulaceve (CAM)** e ndan marrjen dhe përdorimin e karbonit midis natës dhe ditës, duke ndihmuar shumë bimë të kursejnë ujë.
> Këto janë familje strategjish me shumë dallime ndërmjet specieve, jo nivele të njëpasnjëshme bimësh "më të mira". Pragjet shumë të ulëta të dioksidit të karbonit në punim janë supozime për të eksploruar kufij të mundshëm, jo garanci se një ekosistem i ardhshëm do të evoluojë për t'i përdorur ato.

Pse 1,86 miliardë vjet nuk është një datë skadence

Vlerësimi kryesor i punimit prej rreth **1,86 miliardë vjetësh** është mesatarja e dy pikave fundore optimiste: 1,84 miliardë vjet në degën e kufizuar nga dioksidi i karbonit dhe 1,87 miliardë vjet në degën e kufizuar nga nxehtësia. Është një përmbledhje kompakte e dy skenarëve të ndryshëm. Nuk është një rezultat i tretë modeli me saktësi më të madhe dhe nuk është një datë e vlerësuar si më e mundshmja.

Edhe intervali më i gjerë 1,35–1,87 miliardë vjet nuk mbart një probabilitet të vetëm. Vlerat e poshtme dhe të sipërme varen nga supozime të ndryshme të alterimit, pragje të ndryshme biologjike dhe një konfigurim i vetëm i modelit klimatik. Intervali mat zgjedhjet e eksperimentit po aq sa mat kohën.



Intervali 1,35–1,87 miliardë vjet del vetëm pasi zgjidhet një rrugë alterimi, një prag biologjik dhe një kufi modeli. Është një hartë supozimesh, jo një orë që përfundon me zhdukjen e të gjithë jetës.

The Clean Paper CC BY 4.0

Kufij të tjerë mund të mbërrijnë më herët

Vlerësimet më të gjata për biosferën vegjetative afrohen me një kufi tjetër dhe të pasigurt: një efekt serrë i lagësht ose i pakontrolluar që mund të shkaktojë humbje të mëdha të oqeanit. Modelet klimatike ndryshojnë ndjeshëm në vlerësimin se kur fillojnë këto gjendje me rritjen e rrezatimit diellor, veçanërisht larg kushteve të sotme. Disa vlerësime i vendosin ato para kufirit më optimist të fotosintezës.

Kjo do të thotë se dega e sipërme nuk mund të lexohet si premtim se Toka do t'i ruajë oqeanet, kontinentet e njohura ose kushtet e banueshme sipërfaqësore deri 1,87 miliardë vjet nga tani. Modeli gjithashtu nuk përfshin tektonikën e ardhshme të pllakave, ndryshimet në sipërfaqen tokësore, ekosistemet që evoluojnë ose një oqean plotësisht dinamik. Llogaritjet e tij për mënyrën si atmosfera thith dhe emeton energji po shtyhen gjithashtu në regjime me rrezatim diellor intensiv dhe dioksid karboni jashtëzakonisht të ulët, ku modelet e ndryshme ndahen mes tyre.

Përshtatja evolucionare dhe ndërhyrja teknologjike shfaqen në diskutimin e punimit si mundësi. Ato

nuk janë dalje të 29 simulimeve klimatike. Modeli nuk tregon organizma të ardhshëm që evoluojnë një rrugë fotosintetike për një pjesë për milion, dhe nuk tregon një qytetërim që menaxhon atmosferën për një miliard vjet.

Ky nuk është një rezultat për krizën klimatike të sotme

Rritja e ndriçimit diellor vepron gjatë qindra milionë deri miliarda vjetësh. Ngrohja moderne e shkaktuar nga njerëzit vjen nga rritja e shpejtë e gazeve serrë gjatë dekadave dhe shekujve. Janë forca të ndryshme, në shkallë kohore rrënjësisht të ndryshme, që u përgjigjen pyetjeve të ndryshme.

Asgjë në këtë studim nuk e dobësون provën për ndryshimin e sotëm klimatik dhe nuk argumenton për shtyrjen e veprimit. Një biosferë që mund të ruajë një pjesë të jetës fotosintetike në një skenar të largët modeli nuk është e njëjta gjë me një klimë ku shoqëritë dhe ekosistemet e sotme mbeten të sigurta.

Punimi është i vlefshëm sepse e bën një pyetje të largët më të disiplinuar. Ai tregon se modelet më të hershme dhe më të thjeshta mund të jenë ngrohur tepër kur rrezatimi diellor u rrit ndërsa dioksidi i karbonit mbeti i fiksuar, dhe se jeta fotosintetike mund të ketë më shumë rrugë për të vazhduar sesa sugjeron një prag i vetëm kanonik i karbonit. Ai tregon gjithashtu pse çdo pjesë shtesë e një miliardi vjetësh vjen e lidhur me një zinxhir supozimesh.

Dielli që ushqen një gjethe po ndryshon ngadalë. Nëse Toka do të mbetet e gjelbër edhe 1,35, 1,87 apo ndonjë numër tjetër miliardë vjetësh do të varet nga shkëmbinjtë, uji, atmosfera dhe jeta që përgjigjen së bashku. Rezultati i ndershëm nuk është një datë. Është një pamje më e gjerë e kompromisit.

Përmbledhje e shkurtër

Një studim klimatik tredimensional pyet sa gjatë mund të vazhdojë biosfera vegjetative — fotosintetike — e Tokës ndërsa Dielli ngadalë bëhet më i ndritshëm. Studiuesit llogaritën 29 klima të veçanta në gjendje të qëndrueshme dhe gjurmuan përmes tyre dy raste kufitare ilustruese. Me alterim të dobët dhe dioksid karboni të fiksuar në 400 pjesë për milion, kufijtë e zgjedhur të nxehtësisë për bimët tokësore arrihen pas rreth 1,68 dhe 1,87 miliardë vjetësh. Me alterim të fortë dhe temperaturë mesatare globale të fiksuar në 288 kelvin, rreth 15 gradë Celsius, kufijtë e zgjedhur të dioksidit të karbonit për fotosintezën arrihen pas rreth 1,35, 1,64 dhe, duke përdorur një prag të përkohshëm, 1,84 miliardë vjetësh. Vlera e cituar shpesh prej 1,86 miliardë vjetësh është thjesht mesatarja e rrumbullakosur e dy pikave fundore optimiste. Këto janë intervale modeli që varen nga skenari, jo një datë kur do të përfundojnë Toka, njerëzimi ose e gjithë jeta. Modeli përdor rrugë të përcaktuara, gjeografinë e sotme, një oqean slab dhe nuk ka lidhje të shprehur tokë–bimësi ose klimë–alterim; vlerësimet më të gjata afrohen gjithashtu me kufij të pasigurt të efektit serrë dhe humbjes së oqeanit.

Kontroll pa teprime

Çfarë tregon punimi: Në këtë konfigurim të ExoCAM, klimat tredimensionale në përgjithësi ngrohen më pak nën rritjen e rrezatimit diellor dhe dioksid karboni të fiksuar sesa modelet e thjeshtuara të përdorura për krahasim. Në dy raste kufitare të përcaktuara të alterimit dhe disa pragje biologjike të zgjedhura, kufijtë e biosferës vegjetative bien midis afërsisht 1,35 dhe 1,87 miliardë vjet nga tani.

Çfarë është e besueshme, por jo e vendosur: Se disa bimë CAM ose bimë ujore që përdorin bikarbonat të tretur mund të mbajnë fotosintezën pranë një pjese për milion dioksid karboni atmosferik; se përshtatja ose teknologjia mund ta zgjasë më tej jetën fotosintetike; dhe se rruga reale klimë–alterim do të mbetet midis dy rasteve kufitare të modelit.

Çfarë nuk tregon: Një datë fikse për fundin e të gjitha bimëve, gjithë jetës, qytetërimit njerëzor, oqeaneve të Tokës ose planetit; një simulim të vetëm të vazhdueshëm të dy miliardë viteve të ardhshme; ose ndonjë arsye për të minimizuar ndryshimin e sotëm klimatik të shkaktuar nga njerëzit.

Kufizimet kryesore: Njëzet e nëntë raste në gjendje të qëndrueshme nga një familje e vetme modelesh klimatike; rrugë alterimi të përcaktuara dhe jo të lidhura dinamikisht; gjeografia e sotme; një oqean slab; metan i fiksuar; obliquitet dhe ekscentricitet zero; pa toka, bimësi ose feedback të shprehur të biosferës; pragje të pasigurta të nxehtësisë dhe dioksidit të karbonit; dhe mospërputhje të gjera mes modeleve pranë kushteve të serrës së lagësht dhe të pakontrolluar.

Sa besim duhet të ketë një lexues i përgjithshëm? Besim i lartë se studimi zgjeron intervalin e besueshëm të modelit dhe identifikon supozimet që e kontrollojnë atë. Besim mesatar te intervali numerik si një kornizë e dobishme brenda këtij modeli. Besim i ulët në çdo datë të saktë, sepse pikat fundore më të largëta varen nga rrugë klimatike qëllimisht ekstreme dhe biologji e pasigurt.

Burimet

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