The Clean Paper

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

Kiek ilgai Žemė gali išlikti žalia? Klimato modelis pateikia intervalus, o ne pasaulio pabaigos datą

Dvidešimt devynios trimatės klimato simuliacijos skirtingas Žemės fotosintetinės biosferos ribas patalpina maždaug tarp 1,35 ir 1,87 milijardo metų nuo dabar. Reikšmės priklauso nuo sąmoningai supaprastintų uolienų dūlėjimo ir karščio kelių bei nuo mažiausių anglies dioksido lygių, kuriuos augalai galėtų naudoti. Jos neprognozuoja, kada baigsis visi augalai, visa gyvybė, civilizacija ar 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

Kiek ilgai Žemė gali išlikti žalia? Klimato modelis pateikia intervalus, o ne pasaulio pabaigos datą

Lapas gyvena siaurame kompromisų lange. Jam reikia šviesos, vandens, anglies dioksido ir tokios temperatūros, kurią gali toleruoti jo chemija. Per žmogaus gyvenimą Saulė atrodo pastovioji šio kompromiso dalis. Per milijardą metų — ne.

Senei Saulei pagrindinėje sekoje ji pamažu ryškėja. Daugiau saulės šviesos šildo Žemę, tačiau planeta turi ilgalaikį atsaką: lietaus vandens, anglies dioksido ir silikatinių uolienų reakcijos gali pašalinti anglies dioksidą iš atmosferos. Tai susilpnina šiltnamio efektą ir kompensuoja dalį šiltėjimo. Tas pats atsakas, kuris vėsina planetą, ilgainiui gali atimti iš fotosintetinančių organizmų anglį, iš kurios jie kuria gyvąjį audinį.

Naujame Journal of Geophysical Research: Atmospheres straipsnyje klausiama, kuri riba gali būti pasiekta pirma: per daug karščio ar per mažai anglies dioksido. Atsakymas nėra data, kada Žemė „mirs“. Dviejuose sąmoningai supaprastintuose ateities keliuose priimtos fotosintetinės gyvybės ribos patenka maždaug tarp **1,35 ir 1,87 milijardo metų nuo dabar**.

Šis intervalas kalba apie **vegetacinę biosferą**: Žemės gyvosios sistemos dalį, palaikomą fotosintetinančių organizmų, ypač augalų ir kitų gyvybės formų, kurios šviesą ir anglies dioksidą paverčia biologine medžiaga. Tai nėra prognozė kiekvienam mikrobui. Tai nėra žmonių civilizacijos gyvavimo trukmė. Tai nėra planetos gyvavimo trukmė.

Planetinis termostatas turi dvi neaiškias nuostatas

Pagrindinis neapibrėžtumas yra **silikatų dūlėjimas**. Anglies dioksidas ištirpsta lietaus vandenyje, reaguoja su silikatinėmis uolienomis ir galiausiai pernešamas į vandenynus bei nuosėdas. Vulkanai geologiniais laikotarpiais anglies dioksidą grąžina. Kartu šie procesai sudaro dalį karbonatų–silikatų ciklo, dažnai vadinamo planetiniu termostatu.

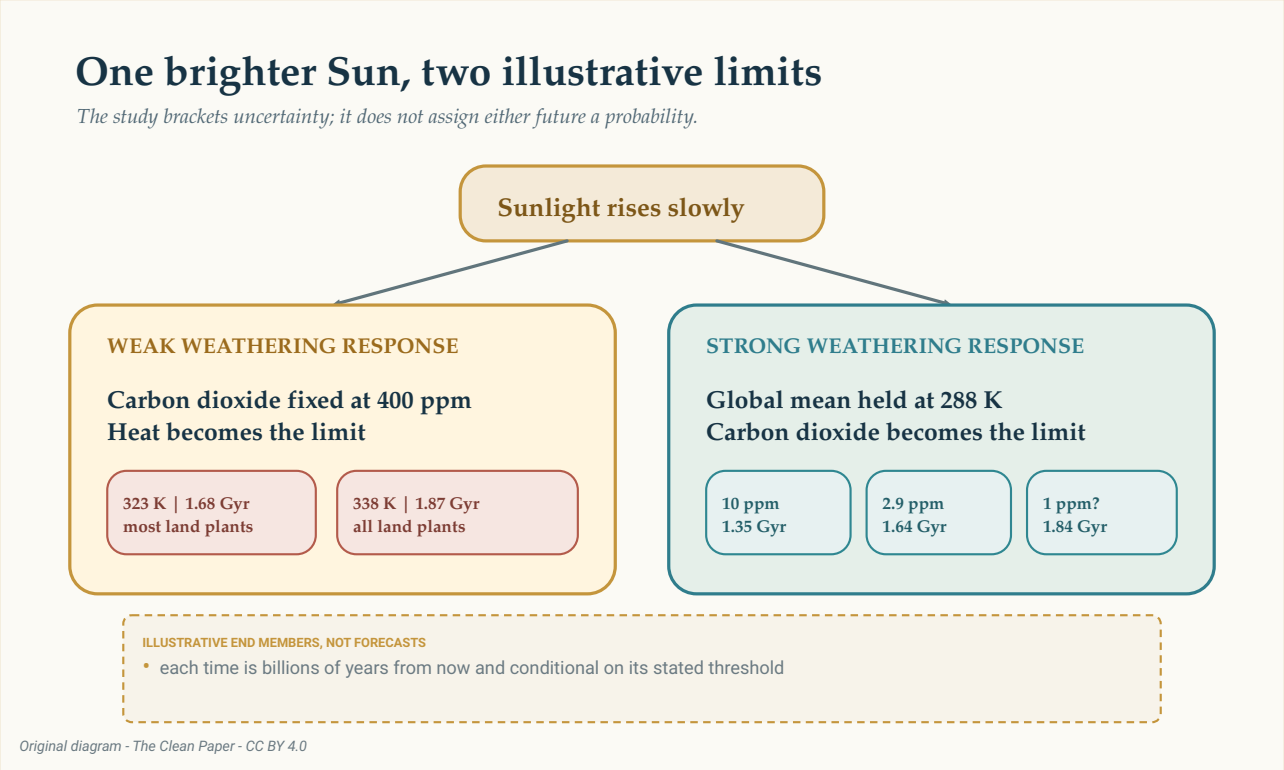
Šiltesniame ir drėgnesniame pasaulyje dūlėjimas gali spartėti ir greičiau pašalinti anglies dioksidą. Tačiau mokslininkai nežino, kiek stipriai šis atsakas valdys Žemę po ryškesne ateities Saule. Todėl Jacob Haqq-Misra ir Eric Wolf nepasirinko vieno tariamai „teisingo“ kelio. Jie modeliavo du **kraštinius atvejus**: sąmoningai ekstremalius scenarijus neapibrėžtumui aprėminti.

- **Silpno dūlėjimo kraštiniame scenarijuje** atmosferos anglies dioksidas lieka 400 milijoninių dalių, o ryškėjanti Saulė kelia temperatūrą.
- **Stipraus dūlėjimo kraštiniame scenarijuje** pasaulinė vidutinė paviršiaus temperatūra išlaikoma 288 kelvinų, maždaug 15 laipsnių Celsijaus, o didėjant saulės šviesai anglies dioksidas mažėja.

Nė viena šaka nepateikiama kaip tikroji Žemės ateitis. Pirmoji klausia, ką padarytų karštis, jei anglies dioksido liktų daug. Antroji klausia, ką padarytų anglies stygius, jei dūlėjimas išlaikytų pasaulinę temperatūrą arti dabartinio vidurkio.

Kaip dūlėjimas gali veikti tarsi termostatas?

Analogija yra apie grįžtamąjį ryšį, o ne tiesioginę valdymo rankenėlę. Kai šiltesnis klimatas pagreitina cheminį dūlėjimą, daugiau atmosferos anglies dioksido gali patekti į ištirpusias medžiagas, mineralus ir nuosėdas. Šio šiltnamio dujų pašalinimas priešinasi daliai pradinio šiltėjimo. Labai ilgu laikotarpiu vulkaninis išsiskyrimas anglies dioksidą grąžina.
Kiekvienos grandies stiprumas priklauso nuo kritulių, atvirų uolienų, erozijos, biologijos, tektonikos ir vandenynų chemijos. Todėl straipsnis tikrina ribinius atsakus, o ne traktuoja „termostatą“ kaip gerai žinomą mašiną.



Straipsnis neapibrėžtą ateitį aprėmina dviem iliustraciniais kraštiniais scenarijais. Jei dūlėjimas reaguoja silpnai, didėjantis karštis pasiekia priimtas sausumos augalų ribas. Jei reaguoja stipriai, mažėjantis anglies dioksidas pasiekia priimtas fotosintezės ribas. Tai sąlyginės modelio šakos, o ne tikimybės ar atgalinės atskaitos datos.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dvidešimt devyni nusistovėję modelių pasauliai, o ne vienas dviejų milijardų metų filmas

Tyrėjai naudojo ExoCAM, trimatį pasaulinį klimato modelį, ir apskaičiavo **29 pusiausvyrinius klimatus** skirtingoms stipresnės saulės šviesos ir mažesnio anglies dioksido kombinacijoms. Kiekvienas atvejis buvo vykdomas 70 modelio metų. Čia vieni modelio metai yra vienas simuliuotas metinis

ciklas esant fiksuotoms sąlygoms: tai skaičiavimo trukmė, skirta dirbtiniam klimatui nusistovėti, o ne vienas žingsnis metų po metų ateities prognozėje. Po to, kai simuliuotas klimatas turėjo laiko nusistovėti, buvo vidurkinami paskutiniai 20 metų.

Šie 29 atvejai yra atskiri modelių pasauliai. Kiekvienas paleidimas yra vienas tinklelio taškas, atsakantis į klausimą „koks nusistovėjęs klimatas atitinka šią pasirinktą saulės šviesos ir anglies dioksido porą?“ Kompiuteris nepradėjo nuo dabartinės Žemės ir nuolat neevoliucionavo jos atmosferos, uolienų, vandenynų bei gyvybės per ateinančius du milijardus metų. Vietoj to autoriai per šiuos iš anksto apskaičiuotus taškus nubrėžė du scheminius dūlėjimo kelius; patys tarpai tarp taškų nebuvo simuliuojami.

Lentelėje atkurtos saulės šviesos ir anglies dioksido kombinacijos iš oficialaus modelio duomenų archyvo. Atvejų ID čia pridėti tik patogesniam skaitymui, archyvo tvarka. **S/S0** yra santykinė Saulės konstanta: modelyje naudojama gaunama saulės energija, padalyta iš dabartinės jos reikšmės S0. Todėl 1,2 reiškia 20 procentų daugiau gaunamos saulės energijos nei šiandien. **CO2 (ppm)** yra atmosferos anglies dioksido maišymosi santykis molekulėmis milijonui atmosferos molekulių.

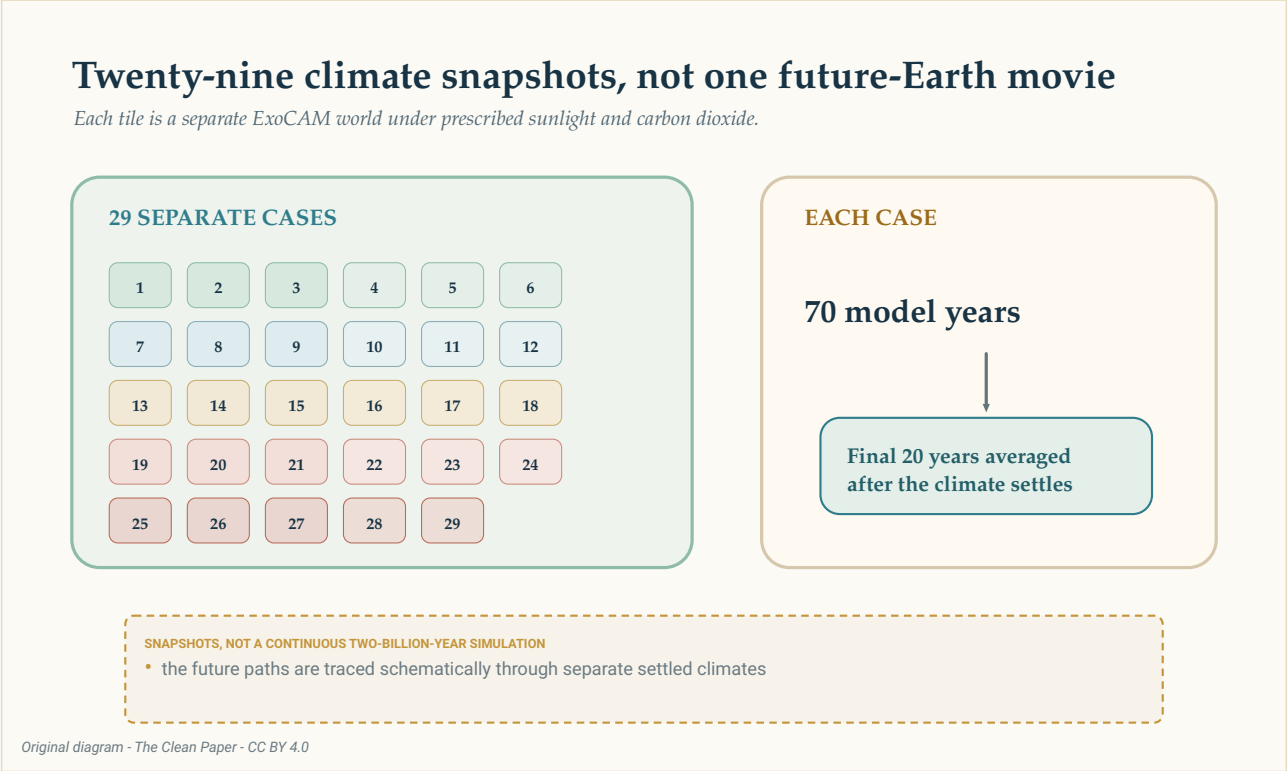
Atvejo ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25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

Atvejo ID	S/S0	CO2 (ppm)
29	1.2	0

Modelio Žemė atpažįstama, bet sąmoningai ribota. Ji Žemės dydžio ir naudoja dabartinę geografiją. Joje yra supaprastintas „sluoksnio“ vandenynas, o ne visiškai cirkuliuojantis vandenynas, atmosferos slėgis nustatytas maždaug į dabartinę Žemės reikšmę — vieną barą — o metano koncentracija fiksuota. Orbita idealiai apskrita — nulinis ekscentricitetas — ir sukimosi ašis neturi posvyrio — nulinis ašies posvyris. Nėra aiškiai modeliuojamų dirvožemių, augmenijos ar kintančios biosferos grįžtamojo ryšio. Svarbiausia, klimato modelis nėra dinamiškai sujungtas su uolienų dūlėjimo modeliu. Kitaip tariant, ExoCAM pats neapskaičiuoja dūlėjimo, neatnaujina pagal jį anglies dioksido ir tada nevykdo kito klimato žingsnio grįžtamojo ryšio cikle. Tyrėjai vietoj to iš anksto nustatė du ribinius kelius ir nubrėžė juos per 29 atvejų klimato tinklelį.

Ką klimato modelyje reiškia „pusiausvyrinė būsena“?

Pusiausvyrinis atvejis yra modelio klimatas, kuriam leidžiama nusistovėti esant vienai pasirinktai Saulei ir atmosferai. Simuliacijos viduje oras vis tiek keičiasi kasdien ir kasmet, tačiau ilgalaikiai vidurkiai nustoja stipriai slinkti.
Tai naudinga klausiant „koks klimatas atitinka šias sąlygas?“ Tai kas kita nei prognozuoti tikslų kelią, kuriuo tikroji Žemė pereis nuo vienų sąlygų prie kitų.



Kiekviena plytelė yra atskiras 70 modelio metų ExoCAM klimato paleidimas, kurio paskutiniai 20 metų suvidurkinti. Tyrimas atrinko 29 nusistovėjusius klimatus pagal iš anksto nustatytas saulės šviesos ir anglies

dioksido sąlygas; jis nesimuliavo vienos nuolat kintančios Žemės du milijardus metų.

The Clean Paper CC BY 4.0

Pirmasis kraštinis scenarijus: anglies dioksido pakanka, karščio per daug

Silpno dūlėjimo šakoje anglies dioksidas lieka fiksuotas ties 400 milijoninių dalių. Saulės srautui didėjant, ribojančiu veiksniu tampa karštis.

Straipsnyje naudojamos dvi pasaulinės vidutinės temperatūros ribos iš ankstesnių darbų:

- Esant **323 kelvinams**, maždaug **50 laipsnių Celsijaus** pasauliniam metiniam vidurkiui, pasaulis laikomas per karštu daugumai sausumos augalų. Modelis šią ribą pasiekia maždaug po **1,68 milijardo metų**.
- Esant **338 kelvinams**, maždaug **65 laipsniams Celsijaus** pasauliniam metiniam vidurkiui, pasaulis laikomas per karštu visiems sausumos augalams. Modelis šią ribą pasiekia maždaug po **1,87 milijardo metų**.

Tai priimtos biologinės ribos, o ne universalios temperatūros, kuriose būtinai žlugtų kiekvienas fotosintetinis organizmas. Pasaulinis vidurkis taip pat paslepia didelius regioninius skirtumus. Tyrimas atskirai nagrinėja, kur temperatūros ir vandens kombinacijos dar galėtų išlikti tinkamos, tačiau žyma klimato žemėlapyje negali išvardyti kiekvieno būsimo prieglobsčio ar prisitaikymo.

Antrasis kraštinis scenarijus: temperatūra toleruotina, anglies dioksido per mažai

Stipraus dūlėjimo šakoje pasaulinė vidutinė temperatūra laikoma 288 kelvinų, maždaug 15 laipsnių Celsijaus, o atmosferos anglies dioksidas mažėja. Čia atsakymas priklauso nuo to, su kiek mažai anglies gali veikti skirtingi fotosintezės keliai.

- Esant tradicinei **10 milijoninių dalių** ribai — 10 anglies dioksido molekulių milijonui atmosferos molekulių — C4 fotosintezės riba pasiekiama maždaug po **1,35 milijardo metų**. C4 fotosintezę naudoja tokie augalai kaip kukurūzai ir cukranendrės; ji koncentruoja anglies dioksidą aplink jį fiksuojantį fermentą.
- Naudojant ankstesniuose darbuose aptartą alternatyvią **2,9 milijoninės dalies** C4 ribą, laikas pailgėja iki maždaug **1,64 milijardo metų**.
- Laikina **1 milijoninės dalies** riba, siejama su galimu kai kurių CAM augalų — naudojančių storlapinių rūgščių metabolizmą, kai anglies dioksidas paimamas naktį, o panaudojamas dieną — arba ištirpusį bikarbonatą naudojančių vandens augalų išlikimu, laiko ribą nukelia iki maždaug **1,84**

milijardo metų.

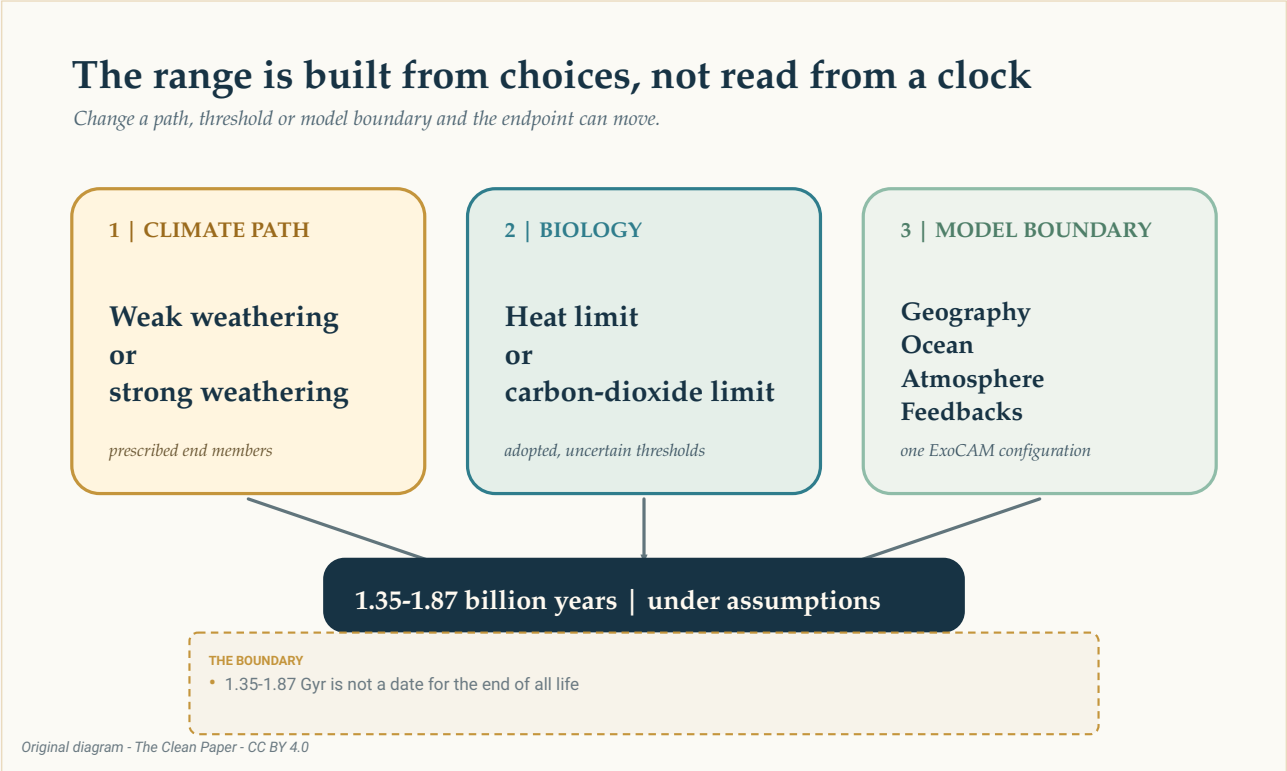
Paskutinis skaičius turi didžiausią biologinę išlygą. Autoriai aiškiai vadina vienos milijoninės dalies ribą preliminaria. Tai nėra eksperimentiškai nustatytas visų CAM augalų ar vandens augmenijos išgyvenimo slenkstis ateities Žemės sąlygomis.

> **C3, C4 ir CAM yra strategijos, o ne laiptai**
>
> Augalai angliai sugauti naudoja skirtingus biocheminius kelius. **C3 fotosintezė** yra dažniausia. **C4 fotosintezė**, kurią naudoja, pavyzdžiui, kukurūzai ir cukranendrės, koncentruoja anglies dioksidą aplink anglį fiksuojantį fermentą ir gali geriau veikti esant mažai CO2. **Storlapinių rūgščių metabolizmas (CAM)** atskiria anglies paėmimą ir panaudojimą tarp nakties ir dienos, todėl daugeliui augalų padeda taupyti vandenį.
> Tai strategijų šeimos su daugybe rūšinių skirtumų, o ne nuoseklios „geresnių“ augalų pakopos. Straipsnio labai mažos anglies dioksido ribos yra prielaidos galimoms riboms tirti, o ne garantija, kad būsima ekosistema evoliucionuos taip, kad jomis pasinaudotų.

Kodėl 1,86 milijardo metų nėra galiojimo pabaigos data

Straipsnio antraštinis maždaug **1,86 milijardo metų** įvertis yra dviejų optimistinių viršutinių galų vidurkis: 1,84 milijardo metų CO2 ribojamoje šakoje ir 1,87 milijardo metų karščio ribojamoje šakoje. Tai glausta dviejų skirtingų scenarijų santrauka. Tai nėra trečias modelio rezultatas su didesniu tikslumu ir nėra geriausias datos įvertis.

Net platesnis 1,35–1,87 milijardo metų intervalas neturi vienos tikimybės. Jo apatinės ir viršutinės reikšmės priklauso nuo skirtingų dūlėjimo prielaidų, skirtingų biologinių ribų ir vienos klimato modelio konfigūracijos. Intervalas matuoja eksperimento pasirinkimus tiek pat, kiek ir laiką.



1,35–1,87 milijardo metų intervalas atsiranda tik pasirinkus dūlėjimo kelią, biologinę ribą ir modelio ribines sąlygas. Tai prielaidų žemėlapis, o ne laikrodis, pasibaigiantis visos gyvybės išnykimu.

The Clean Paper CC BY 4.0

Kitos ribos gali ateiti anksčiau

Ilgiausi vegetacinės biosferos įverčiai priartėja prie atskiros ir neaiškios ribos: drėgno arba nekontroliuojamo šiltnamio efekto, galinčio paskatinti didelį vandenynų praradimą. Klimato modeliai labai nesutaria, kada tokios būsenos prasidėtų didėjant saulės srautui, ypač toli nuo dabartinių sąlygų. Kai kurie įverčiai jas patalpina anksčiau už optimistiškiausią fotosintezės ribą.

Tai reiškia, kad viršutinės šakos negalima skaityti kaip pažado, jog Žemė išlaikys savo vandenynus, pažįstamus žemynus ar tinkamas paviršiaus sąlygas iki 1,87 milijardo metų nuo dabar. Modelis taip pat neapima būsimų plokščių tektonikos pokyčių, sausumos ploto kitimo, besivystančių ekosistemų ar visiškai dinaminio vandenyno. Jo skaičiavimai, kaip atmosfera sugeria ir išspinduliuoja energiją, taip pat stumiami į labai intensyvios saulės šviesos ir itin mažo anglies dioksido režimus, kuriuose skirtingi modeliai išsiskiria.

Evoliucinis prisitaikymas ir technologinis įsikišimas straipsnio diskusijoje pateikiami kaip galimybės. Jie nėra 29 klimato simuliacijų rezultatai. Modelis neparodo, kad būsimi organizmai evoliucionuos fotosintezės kelią, veikiantį su viena milijonine dalimi CO_2, ir neparodo civilizacijos, milijardą metų valdančios atmosferą.

Tai nėra rezultatas apie šiandienos klimato krizę

Saulės ryškėjimas veikia per šimtus milijonų ar milijardus metų. Dabartinį žmogaus sukeltą šiltėjimą lemia sparčiai didėjančios šiltnamio dujos per dešimtmečius ir šimtmečius. Tai skirtingi poveikiai visiškai skirtingais laiko mastais, atsakantys į skirtingus klausimus.

Niekas šiame tyrime nesusilpnina dabartinės klimato kaitos įrodymų ir nėra argumentas atidėlioti veiksmus. Biosfera, galbūt išlaikanti tam tikrą fotosintetinę gyvybę viename tolimame modelio scenarijuje, nėra tas pats kaip klimatas, kuriame saugios išlieka dabartinės visuomenės ir ekosistemos.

Straipsnis vertingas tuo, kad tolimą klausimą padaro drausmingesnį. Jis rodo, kad ankstesni, paprastesni modeliai galėjo pernelyg stipriai šildyti klimatą, kai saulės srautas didėjo, o anglies dioksidas buvo laikomas fiksuotas, ir kad fotosintetinė gyvybė gali turėti daugiau išlikimo kelių nei numato viena kanoninė anglies riba. Jis taip pat parodo, kodėl kiekviena papildoma milijardo metų dalis ateina kartu su prielaidų grandine.

Saulė, kuri maitina lapą, pamažu keičiasi. Ar Žemė išliks žalia dar 1,35, 1,87 ar kitą skaičių milijardų metų, priklausys nuo to, kaip kartu reaguos uolienos, vanduo, atmosfera ir gyvybė. Sąžiningas rezultatas nėra data. Tai platesnis šio kompromiso vaizdas.

Trumpa santrauka

Trimatis klimato tyrimas klausia, kiek ilgai Žemės vegetacinė — fotosintetinė — biosfera galėtų išlikti Saulei pamažu ryškėjant. Tyrėjai apskaičiavo 29 atskirus pusiausvyrinius klimatus ir per juos nubrėžė du iliustracinius kraštinius scenarijus. Esant silpnam dūlėjimui ir 400 milijoninių dalių fiksuotam anglies dioksidui, priimtos sausumos augalų karščio ribos pasiekiamos maždaug po 1,68 ir 1,87 milijardo metų. Esant stipriam dūlėjimui ir 288 kelvinų, maždaug 15 laipsnių Celsijaus, pasaulinei vidutinei temperatūrai, priimtos fotosintezės anglies dioksido ribos pasiekiamos maždaug po 1,35, 1,64 ir, naudojant preliminarią ribą, 1,84 milijardo metų. Dažnai cituojami 1,86 milijardo metų yra tik suapvalintas dviejų optimistinių viršutinių galų vidurkis. Tai scenarijų priklausomi modelio intervalai, o ne data, kada baigsis Žemė, žmonija ar visa gyvybė. Modelyje naudojami iš anksto nustatyti keliai, dabartinė geografija, sluoksnio vandenynas, nėra aiškiai modeliuojamo dirvožemio–augmenijos ar klimato–dūlėjimo ryšio, o ilgiausi įverčiai priartėja prie neaiškių šiltnamio ir vandenynų praradimo ribų.

Be pagražinimų

Ką straipsnis parodo: Šioje ExoCAM konfigūracijoje, didėjant saulės šviesai ir esant fiksuotam anglies dioksidui, trimatis klimatas paprastai šyla mažiau nei supaprastinti palyginimui naudoti modeliai. Dviejuose iš anksto nustatytuose dūlėjimo kraštiniuose scenarijuose ir naudojant kelias biologines ribas vegetacinės biosferos ribos patenka maždaug tarp 1,35 ir 1,87 milijardo metų nuo

dabar.

Kas tikėtina, bet nenustatyta: Kad kai kurie CAM augalai ar ištirpusį bikarbonatą naudojantys vandens augalai galėtų palaikyti fotosintezę esant maždaug vienai milijoninei atmosferos CO2 daliai; kad prisitaikymas ar technologijos galėtų fotosintetinę gyvybę pratęsti dar labiau; ir kad tikras klimato–dūlėjimo kelias liks tarp dviejų modelio kraštinių scenarijų.

Ko straipsnis neparodo: Fiksuotos visų augalų, visos gyvybės, žmonių civilizacijos, Žemės vandenynų ar planetos pabaigos datos; vienos nenutrūkstamos ateinančių dviejų milijardų metų simuliacijos; ar kokios nors priežasties nuvertinti dabartinę žmogaus sukeltą klimato kaitą.

Pagrindiniai apribojimai: Dvidešimt devyni pusiausvyriniai atvejai iš vienos klimato modelių šeimos; iš anksto nustatyti, o ne dinamiškai susieti dūlėjimo keliai; dabartinė geografija; sluoksnio vandenynas; fiksuotas metanas; nulinis ašies posvyris ir ekscentricitetas; nėra aiškiai modeliuojamų dirvožemių, augmenijos ar biosferos grįžtamojo ryšio; neaiškios karščio ir anglies dioksido ribos; ir didelis modelių nesutarimas arti drėgno bei nekontroliuojamo šiltnamio sąlygų.

Kiek pasitikėjimo turėtų turėti bendras skaitytojas? Didelį pasitikėjimą, kad tyrimas praplečia tikėtiną modelių intervalą ir aiškiai parodo jį valdančias prielaidas. Vidutinį pasitikėjimą skaitiniu intervalu kaip naudingu šio modelio ribiniu įverčiu. Mažą pasitikėjimą bet kokia tikslia data, nes tolimiausi galai priklauso nuo sąmoningai ekstremalių klimato kelių ir neaiškios biologijos.

Šaltiniai

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