The Clean Paper

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

Cik ilgi Zeme var palikt zaļa? Klimata modelis piedāvā diapazonus, nevis pastardienas datumu

Divdesmit deviņas trīsdimensiju klimata simulācijas fotosintētiskās biosfēras iespējamo robežu novieto aptuveni 1,35–1,87 miljardus gadu nākotnē. Vērtības ir atkarīgas no apzināti vienkāršotiem iežu dēdēšanas un siltuma attīstības ceļiem, kā arī no zemākajiem oglekļa dioksīda līmeņiem, ko augi varētu izmantot. Tās neprognozē, kad beigs pastāvēt visi augi, visa dzīvība, civilizācija vai pati planēta.

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

Cik ilgi Zeme var palikt zaļa? Klimata modelis piedāvā diapazonus, nevis pastardienas datumu

Lapa dzīvo šaurā kompromisā. Tai vajag gaismu, ūdeni, oglekļa dioksīdu un tādu temperatūru, ko spēj panest tās ķīmiskie procesi. Cilvēka dzīves laikā Saule šķiet nemainīgā šī kompromisa daļa. Miljarda gadu mērogā tā nav.

Saulei novecojot galvenajā secībā, tā lēnām kļūst spožāka. Vairāk saules starojuma silda Zemi, taču planētai ir ilgtermiņa atbildes mehānisms: reakcijas starp lietusūdeni, oglekļa dioksīdu un silikātu iežiem var izņemt oglekļa dioksīdu no atmosfēras. Tas vājina siltumnīcas efektu un kompensē daļu no sasilšanas. Taču tas pats mehānisms, kas planētu atdzesē, galu galā var atņemt fotosintētiskiem organismiem oglekli, ko tie izmanto dzīvo audu veidošanai.

Jaunā Journal of Geophysical Research: Atmospheres publikācija jautā, kura robeža varētu pienākt pirmā: pārāk liels karstums vai pārāk maz oglekļa dioksīda. Atbilde nav datums, kad Zeme nomirs. Divos apzināti vienkāršotos nākotnes ceļos pieņemtās fotosintētiskās dzīvības robežas atrodas aptuveni **1,35–1,87 miljardus gadu nākotnē**.

Šis diapazons attiecas uz **veģetatīvo biosfēru** — Zemes dzīvās sistēmas daļu, ko uztur fotosintētiski organismi, īpaši augi un cita dzīvība, kas gaismu un oglekļa dioksīdu pārvērš bioloģiskā materiālā. Tā nav prognoze katram mikrobam. Tas nav cilvēku civilizācijas mūža ilgums. Tas nav planētas mūža ilgums.

Planētas termostatam ir divi nenoteikti iestatījumi

Galvenā nenoteiktība ir **silikātu dēdēšana**. Oglekļa dioksīds izšķīst lietusūdenī, reaģē ar silikātu iežiem un galu galā tiek aiznests uz okeāniem un nogulumiem. Ģeoloģiskos laika mērogos vulkāni oglekļa dioksīdu atgriež. Kopā šie procesi veido daļu no karbonātu–silikātu cikla, ko bieži raksturo kā planētas termostatu.

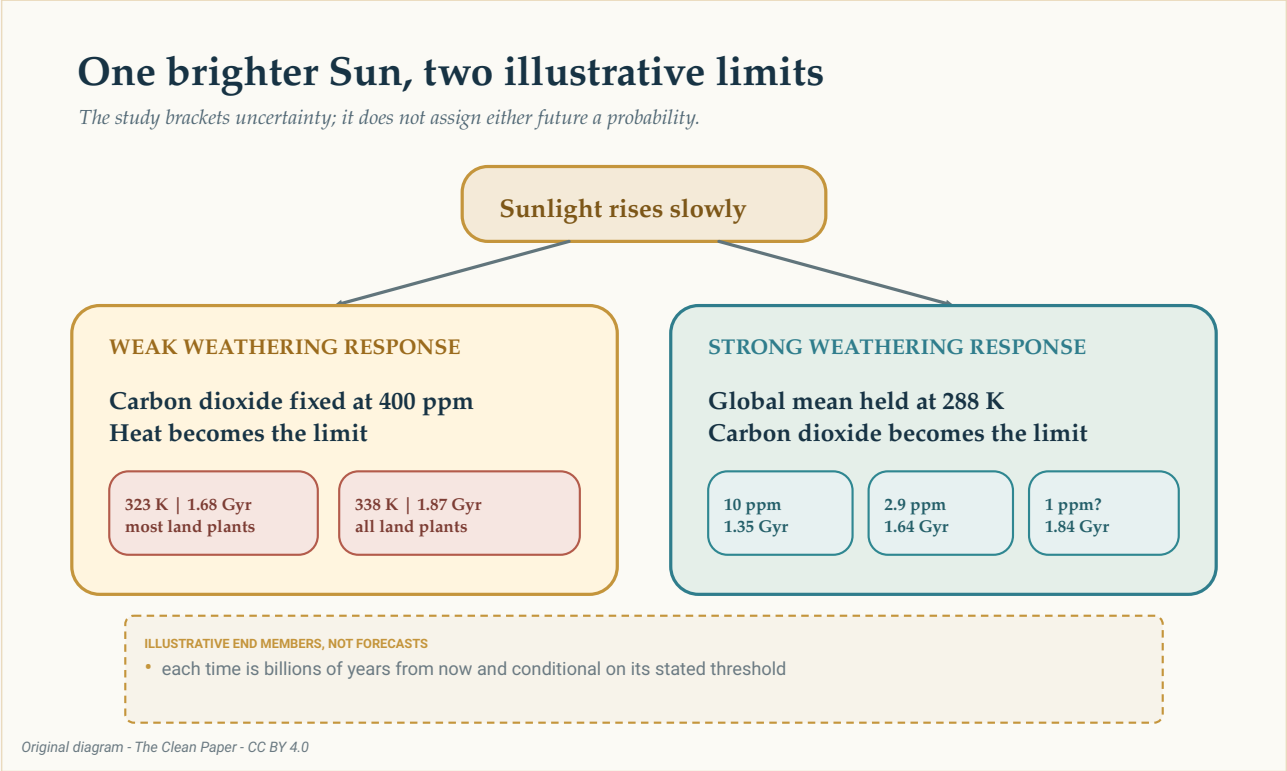
Siltākā un mitrākā pasaulē dēdēšana var paātrināties un ātrāk izņemt oglekļa dioksīdu. Taču zinātnieki nezina, cik spēcīgi šī atgriezeniskā saite noteiks Zemes attīstību pie spožākas nākotnes Saules. Tāpēc Jacob Haqq-Misra un Eric Wolf neizvēlējās vienu it kā pareizu ceļu. Viņi modelēja divus **robežscenārijus** — apzināti galējus gadījumus, kas ierobežo nenoteiktību.

- **Vājas dēdēšanas robežscenārijā** atmosfēras oglekļa dioksīds paliek 400 daļas uz miljonu, kamēr spožākā Saule paaugstina temperatūru.
- **Spēcīgas dēdēšanas robežscenārijā** globālā vidējā virsmas temperatūra paliek 288 kelvini jeb ap 15 grādiem pēc Celsija, bet, saules starojumam pieaugot, oglekļa dioksīda daudzums samazinās.

Neviens no šiem atzariem netiek pasniegts kā Zemes faktiskā nākotne. Pirmais jautā, ko izdarītu karstums, ja oglekļa dioksīds paliktu augsts. Otrais jautā, ko izdarītu oglekļa bads, ja dēdēšana noturētu globālo temperatūru tuvu mūsdienu vidējai vērtībai.

Kā dēdēšana var darboties kā termostats?

Analoģija attiecas uz atgriezenisko saiti, nevis burtisku regulatoru. Ja siltāks klimats paātrina ķīmisko dēdēšanu, vairāk atmosfēras oglekļa dioksīda var nonākt izšķīdušā materiālā, minerālos un nogulumos. Šīs siltumnīcas gāzes izņemšana darbojas pretēji daļai sākotnējās sasilšanas. Ļoti ilgos laika mērogos vulkāniskā degazācija oglekļa dioksīdu atgriež.
Katras saites stiprums ir atkarīgs no nokrišņiem, atsegto iežu daudzuma, erozijas, bioloģijas, tektonikas un okeāna ķīmijas. Tāpēc darbā tiek pārbaudītas robežreakcijas, nevis termostats traktēts kā labi zināma mašīna.



Darbs nenoteikto nākotni ierobežo ar diviem ilustratīviem robežscenārijiem. Ja dēdēšana reaģē vāji, pieaugošais karstums sasniedz pieņemtās sauszemes augu robežas. Ja tā reaģē spēcīgi, krītošais oglekļa dioksīda līmenis sasniedz pieņemtās fotosintēzes robežas. Tie ir nosacīti modeļa atzari, nevis varbūtības vai atpakaļskaitīšanas datumi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Divdesmit deviņas nostabilizējušās modeļa pasaules, nevis viena divu miljardu gadu filma

Pētnieki izmantoja ExoCAM — trīsdimensiju globālu klimata modeli —, lai aprēķinātu **29 līdzsvara stāvokļa klimatus** dažādās lielāka saules starojuma un zemāka oglekļa dioksīda kombinācijās. Katrs

gadījums tika darbināts 70 modeļa gadus. Šeit viens modeļa gads ir viens simulēts gada cikls pie fiksētiem nosacījumiem: tas ir izpildes laiks, kas ļauj mākslīgajam klimatam nostabilizēties, nevis viens solis Zemes nākotnes prognozē gadu pēc gada. Pēc tam, kad simulētajam klimatam bija dots laiks nostabilizēties, tika vidējoti pēdējie 20 gadi.

Šie 29 gadījumi ir atsevišķas modeļa pasaules. Katrs aprēķins ir viens punkts režģī, kas atbild uz jautājumu: "Kāds līdzsvarots klimats atbilst šai izvēlētajai saules starojuma un oglekļa dioksīda kombinācijai?" Dators nesāka ar šodienas Zemi un nepārtraukti neattīstīja tās atmosfēru, iežus, okeānus un dzīvos organismus nākamos divus miljardus gadu. Tā vietā autori izvilka abus shematiskos dēdēšanas ceļus caur šiem iepriekš aprēķinātajiem punktiem; pats ceļš starp punktiem netika simulēts.

Tabulā atkārtotas saules starojuma un oglekļa dioksīda kombinācijas no oficiālā modeļa datu arhīva. Gadījumu ID šeit pievienoti lasīšanas ērtībai arhīva secībā. **S/S0** ir relatīvā Saules konstante: modelī izmantotā ienākošā Saules enerģija dalīta ar tās mūsdienu vērtību S0. Tādējādi 1,2 nozīmē par 20 procentiem vairāk ienākošās Saules enerģijas nekā šodien. **CO2 (ppm)** ir atmosfēras oglekļa dioksīda maisījuma attiecība molekulās uz miljonu atmosfēras molekulu.

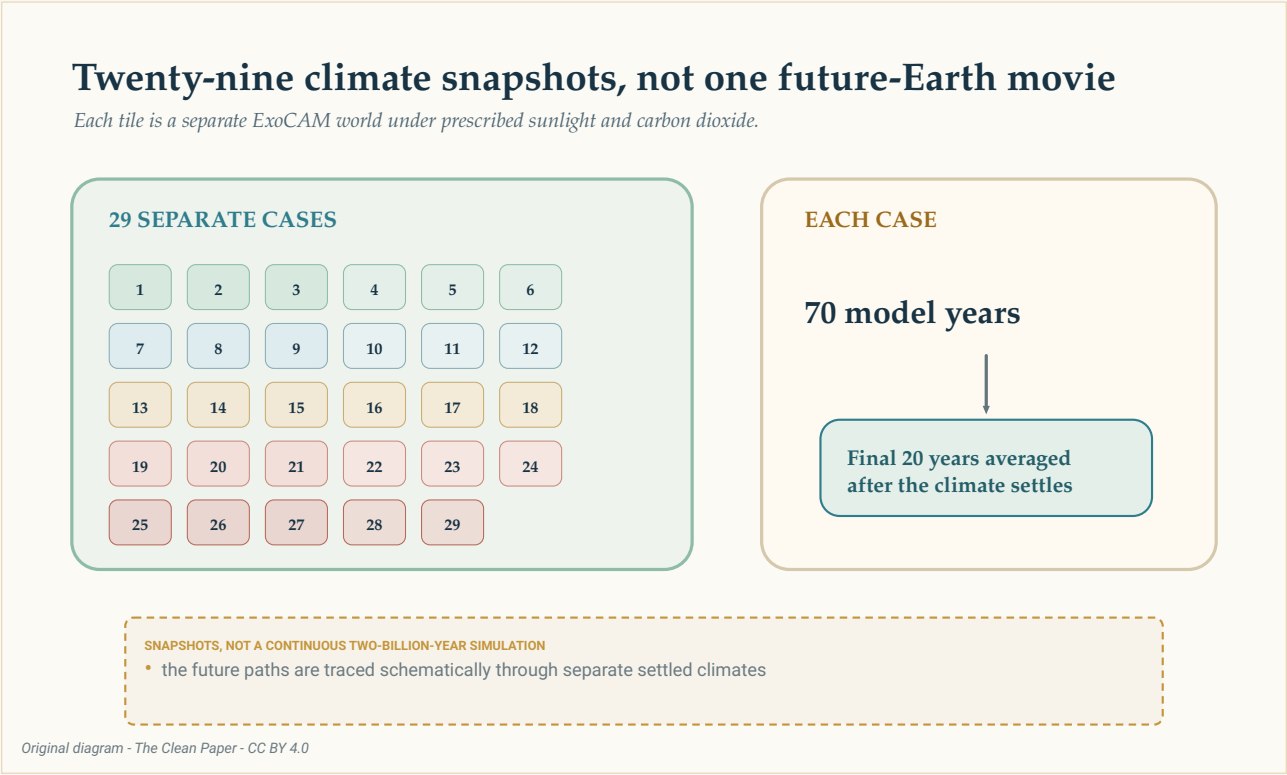
Gadījuma ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143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

Gadījuma ID	S/S0	CO2 (ppm)
28	1.2	0.45
29	1.2	0

Modeļa Zeme ir atpazīstama, taču apzināti ierobežota. Tā ir Zemes izmērā un izmanto mūsdienu ģeogrāfiju. Tai ir vienkāršots slāņa okeāns, nevis pilnībā cirkulējošs okeāns, atmosfēras spiediens iestatīts aptuveni uz Zemes pašreizējo vērtību (vienu bāru), un metāna daudzums ir fiksēts. Orbīta ir ideāli apļveida (nulle ekscentricitātes), un rotācijas ass nav sasvērta (nulle ass slīpuma). Modelī nav tieši aprakstītas augsnes, veģetācija vai mainīgas biosfēras atgriezeniskā saite. Pats svarīgākais — klimata modelis nav dinamiski sasaistīts ar iežu dēdēšanas modeli. Citiem vārdiem, ExoCAM neaprēķina dēdēšanu, neizmanto to oglekļa dioksīda atjaunināšanai un tad nepalaida nākamo klimata stāvokli atgriezeniskās saites ciklā. Pētnieki paši noteica abus robežceļus un izsekoja tos caur 29 gadījumu klimata režģi.

Ko klimata modelī nozīmē "līdzsvara stāvoklis"?

Līdzsvara stāvokļa gadījumā modeļa klimatam ļauj nostabilizēties pie viena izvēlēta Saules starojuma un atmosfēras sastāva. Simulācijā laikapstākļi joprojām mainās no dienas uz dienu un no gada uz gadu, bet to ilgtermiņa vidējās vērtības vairs stipri nenovirzās.
Tas ir noderīgi, lai jautātu: "Kāds klimats atbilst šiem nosacījumiem?" Tas atšķiras no precīza ceļa prognozēšanas, pa kuru īstā Zeme pāriet no viena nosacījumu kopuma uz nākamo.



Katra kartīte ir atsevišķs ExoCAM klimata aprēķins 70 modeļa gadiem, vidējot pēdējos 20 gadus. Pētījums

atlasīja 29 nostabilizējušos klimatus pie noteiktiem Saules starojuma un oglekļa dioksīda nosacījumiem; tas nesimulēja vienu nepārtraukti mainīgu Zemi divus miljardus gadu.

The Clean Paper CC BY 4.0

Pirmais robežscenārijs: oglekļa dioksīda pietiek, karstuma ir par daudz

Vājas dēdēšanas atzarā oglekļa dioksīds paliek fiksēts 400 daļas uz miljonu. Saules starojumam pieaugot, ierobežojošais faktors kļūst karstums.

Darbā izmantotas divas globālās vidējās temperatūras robežas no iepriekšējiem pētījumiem:

- Pie **323 kelviniem**, aptuveni **50 grādiem pēc Celsija** kā globālās gada vidējās temperatūras, pasaule tiek uzskatīta par pārāk karstu lielākajai daļai sauszemes augu. Modelis šo robežu sasniedz pēc aptuveni **1,68 miljardiem gadu**.
- Pie **338 kelviniem**, aptuveni **65 grādiem pēc Celsija** kā globālās gada vidējās temperatūras, pasaule tiek uzskatīta par pārāk karstu visiem sauszemes augiem. Modelis šo robežu sasniedz pēc aptuveni **1,87 miljardiem gadu**.

Tās ir pieņemtas bioloģiskas robežas, nevis universālas temperatūras, pie kurām noteikti neizdodas katrs fotosintētiskais organisms. Globālā vidējā vērtība arī slēpj lielas reģionālas atšķirības. Pētījums atsevišķi aplūko, kur temperatūras un ūdens kombinācijas varētu palikt piemērotas, taču marķējums klimata kartē nevar uzskaitīt katru nākotnes patvērumu vai pielāgojumu.

Otrais robežscenārijs: panesama temperatūra, pārāk maz oglekļa dioksīda

Spēcīgas dēdēšanas atzarā globālā vidējā temperatūra tiek turēta pie 288 kelviniem jeb aptuveni 15 grādiem pēc Celsija, kamēr atmosfēras oglekļa dioksīda daudzums krītas. Šeit atbilde ir atkarīga no tā, cik maz oglekļa varētu izmantot dažādi fotosintēzes ceļi.

- Pie tradicionālās **10 daļas uz miljonu** robežas — 10 oglekļa dioksīda molekulas uz katru miljonu atmosfēras molekulu — C4 fotosintēzes robeža pienāk pēc aptuveni **1,35 miljardiem gadu**. C4 fotosintēzi izmanto, piemēram, kukurūza un cukurniedres; tā koncentrē oglekļa dioksīdu ap fermentu, kas to fiksē.
- Izmantojot iepriekšējos darbos apspriesto alternatīvo **2,9 daļas uz miljonu** C4 robežu, laiks pārbīdās uz aptuveni **1,64 miljardiem gadu**.
- Provizoriska **1 daļas uz miljonu** robeža, kas saistīta ar iespējamu dažu CAM augu — augu ar krasulaceju skābju metabolismu, kas atdala oglekļa dioksīda uzņemšanu naktī no tā izmantošanas

dienā — vai ūdensaugu, kuri spēj izmantot izšķīdušu bikarbonātu, saglabāšanos, pārbīda to uz aptuveni **1,84 miljardiem gadu**.

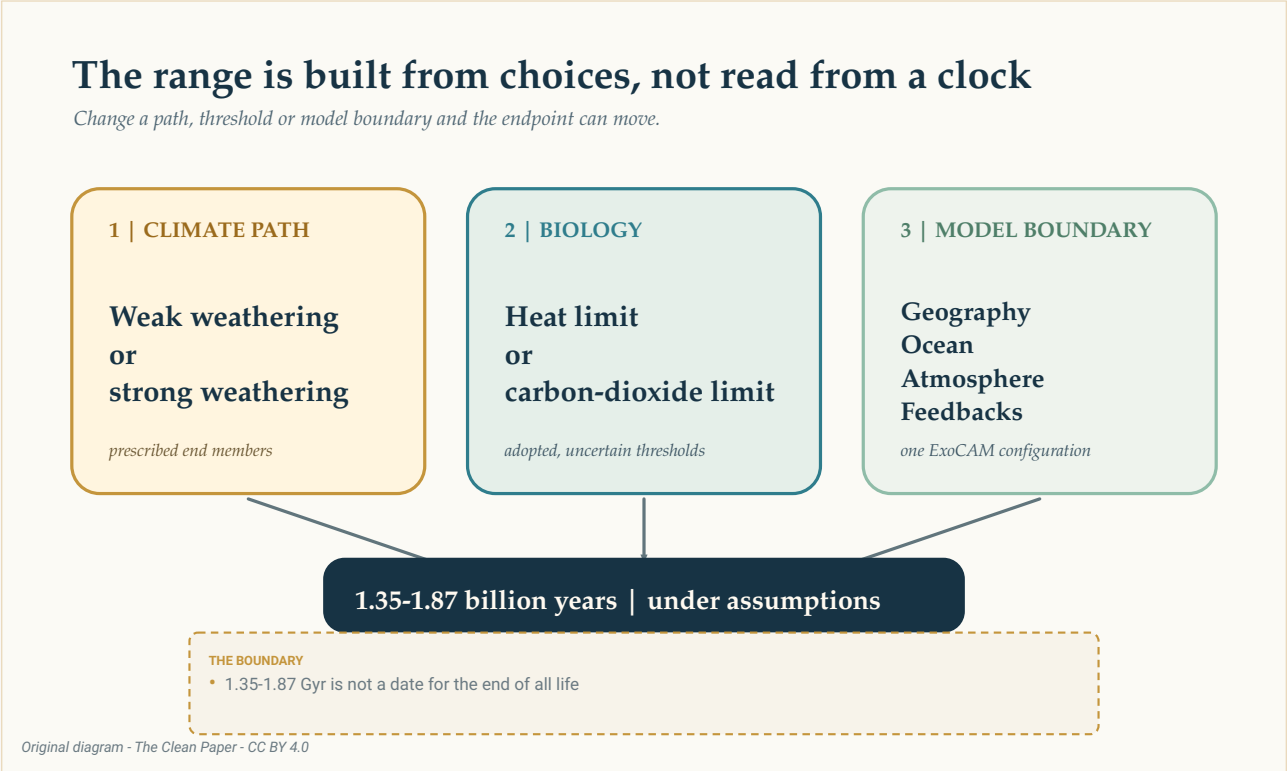
Pēdējam skaitlim ir vislielākā bioloģiskā atruna. Autori vienas daļas uz miljonu robežu nepārprotami sauc par provizorisku. Tā nav eksperimentāli noteikta izdzīvošanas robeža visiem CAM augiem vai ūdens veģetācijai nākotnes Zemes apstākļos.

> **C3, C4 un CAM ir stratēģijas, nevis pakāpieni**
>
> Augi oglekļa uztveršanai izmanto dažādus bioķīmiskus ceļus. **C3 fotosintēze** ir visizplatītākā. **C4 fotosintēze**, ko izmanto, piemēram, kukurūza un cukurniedres, koncentrē oglekļa dioksīdu ap oglekli fiksējošo fermentu un var darboties labāk, kad oglekļa dioksīda ir maz. **Krasulaceju skābju metabolisms (CAM)** nošķir oglekļa uzņemšanu un izmantošanu starp nakti un dienu, daudziem augiem palīdzot taupīt ūdeni.
> Tās ir stratēģiju grupas ar daudzām atšķirībām starp sugām, nevis secīgi "labāku" augu līmeņi. Darba ļoti zemās oglekļa dioksīda robežas ir pieņēmumi, lai izpētītu iespējamos ierobežojumus, nevis garantija, ka nākotnes ekosistēma attīstīs spēju tās izmantot.

Kāpēc 1,86 miljardi gadu nav derīguma termiņš

Darba virsrakstos bieži izceltais novērtējums ap **1,86 miljardiem gadu** ir divu optimistisko augšējo galapunktu vidējā vērtība: 1,84 miljardi gadu oglekļa dioksīda ierobežotajā atzarā un 1,87 miljardi gadu karstuma ierobežotajā atzarā. Tas ir kompakts divu atšķirīgu scenāriju kopsavilkums. Tas nav trešais modeļa rezultāts ar lielāku precizitāti un nav vislabākais datuma novērtējums.

Pat plašākajam 1,35–1,87 miljardu gadu intervālam nav vienas varbūtības. Tā apakšējā un augšējā vērtība ir atkarīga no dažādiem dēdēšanas pieņēmumiem, dažādām bioloģiskām robežām un vienas klimata modeļa konfigurācijas. Diapazons mēra eksperimentā izdarītās izvēles tikpat daudz, cik tas mēra laiku.



1,35–1,87 miljardu gadu diapazons rodas tikai pēc dēdēšanas ceļa, bioloģiskās robežas un modeļa robežnosacījumu izvēles. Tā ir pieņēmumu karte, nevis pulkstenis, kura beigās izmirst visa dzīvība.

The Clean Paper CC BY 4.0

Citas robežas var pienākt agrāk

Garākie veģetatīvās biosfēras novērtējumi tuvojas citai, nenoteiktai robežai: mitram vai nekontrolējamam siltumnīcas efektam, kas varētu izraisīt lielus okeāna zudumus. Klimata modeļi būtiski atšķiras jautājumā par to, kad pie pieaugoša saules starojuma sākas šie stāvokļi, īpaši ļoti tālu no mūsdienu apstākļiem. Daži novērtējumi tos novieto pirms optimistiskākās fotosintēzes robežas.

Tas nozīmē, ka augšējo atzaru nevar lasīt kā solījumu, ka Zeme saglabās okeānus, pazīstamos kontinentus vai apdzīvojamus virsmas apstākļus līdz 1,87 miljardiem gadu nākotnē. Modelī nav arī nākotnes plātņu tektonikas, sauszemes platības izmaiņu, evolucionējošu ekosistēmu vai pilnībā dinamiska okeāna. Arī aprēķini par to, kā atmosfēra absorbē un izstaro enerģiju, tiek izmantoti intensīva saules starojuma un ārkārtīgi zema oglekļa dioksīda režīmos, kuros dažādu modeļu rezultāti sāk atšķirties.

Evolucionāra pielāgošanās un tehnoloģiska iejaukšanās darba diskusijā parādās kā iespējas. Tās nav 29 klimata simulāciju rezultāti. Modelis neparāda nākotnes organismus, kas evolucionē līdz fotosintēzes ceļam pie vienas daļas uz miljonu, un neparāda civilizāciju, kas miljardu gadu pārvalda atmosfēru.

Tas nav rezultāts par mūsdienu klimata krīzi

Saules spožuma pieaugums darbojas simtiem miljonu līdz miljardiem gadu. Mūsdienu cilvēku izraisīto sasilšanu rada straujš siltumnīcas gāzu pieaugums desmitgažu un gadsimtu laikā. Tie ir atšķirīgi ierosinātāji radikāli atšķirīgos laika mērogos, kas atbild uz atšķirīgiem jautājumiem.

Nekas šajā pētījumā nevājina pierādījumus par pašreizējām klimata pārmaiņām un nav arguments rīcības atlikšanai. Biosfēra, kas vienā tālā modeļa scenārijā varētu saglabāt daļu fotosintētiskās dzīvības, nav tas pats, kas klimats, kurā mūsdienu sabiedrības un ekosistēmas paliek drošībā.

Darbs ir vērtīgs, jo tas attālu jautājumu padara disciplinētāku. Tas rāda, ka agrāki, vienkāršāki modeļi varēja sasilt pārāk daudz, kad saules starojums tika palielināts, bet oglekļa dioksīds turēts nemainīgs, un ka fotosintētiskajai dzīvībai var būt vairāk saglabāšanās ceļu, nekā liek domāt viena kanoniska oglekļa robeža. Tas arī parāda, kāpēc katrai papildu miljarda gada daļai līdzi nāk pieņēmumu ķēde.

Saule, kas baro lapu, lēnām mainās. Tas, vai Zeme paliks zaļa vēl 1,35, 1,87 vai citu miljardu gadu skaitu, būs atkarīgs no iežu, ūdens, atmosfēras un dzīvības kopīgas reakcijas. Godīgais rezultāts nav datums. Tas ir plašāks skats uz šo kompromisu.

Īss kopsavilkums

Trīsdimensiju klimata pētījums jautā, cik ilgi, Saulei lēni kļūstot spožākai, varētu saglabāties Zemes veģetatīvā jeb fotosintētiskā biosfēra. Pētnieki aprēķināja 29 atsevišķus līdzsvara stāvokļa klimatus un caur tiem izsekoja divus ilustratīvus robežscenārijus. Pie vājas dēdēšanas un oglekļa dioksīda, kas fiksēts 400 daļas uz miljonu, pieņemtās sauszemes augu karstuma robežas tiek sasniegtas pēc aptuveni 1,68 un 1,87 miljardiem gadu. Pie spēcīgas dēdēšanas un globālās vidējās temperatūras, kas fiksēta 288 kelvinos jeb aptuveni 15 grādos pēc Celsija, pieņemtās fotosintēzes oglekļa dioksīda robežas tiek sasniegtas pēc aptuveni 1,35, 1,64 un — izmantojot provizorisku robežu — 1,84 miljardiem gadu. Bieži citētie 1,86 miljardi gadu ir tikai abu optimistisko augšējo galapunktu noapaļotā vidējā vērtība. Tie ir no scenārija atkarīgi modeļa diapazoni, nevis datums, kad beigsies Zeme, cilvēce vai visa dzīvība. Modelis izmanto iepriekš noteiktus ceļus, mūsdienu ģeogrāfiju, slāņa okeānu un neietver tiešu augsnes–veģetācijas vai klimata–dēdēšanas sasaisti; garākie novērtējumi tuvojas nenoteiktām siltumnīcas un okeāna zuduma robežām.

Bez pārspīlējumiem

Ko darbs parāda: Šajā ExoCAM konfigurācijā trīsdimensiju klimati, pieaugot saules starojumam un saglabājot fiksētu oglekļa dioksīdu, kopumā sasilst mazāk nekā salīdzinājumam izmantotie vienkāršotie modeļi. Divos iepriekš noteiktos dēdēšanas robežscenārijos un pie vairākām pieņemtām bioloģiskām robežām veģetatīvās biosfēras ierobežojumi atrodas aptuveni 1,35–1,87 miljardus gadu nākotnē.

Kas ir ticams, bet nav pierādīts: Ka daži CAM augi vai ūdensaugi, kuri izmanto izšķīdušu bikarbonātu, varētu uzturēt fotosintēzi pie aptuveni vienas atmosfēras oglekļa dioksīda daļas uz miljonu; ka pielāgošanās vai tehnoloģijas varētu fotosintētisko dzīvību pagarināt vēl vairāk; un ka reālais klimata–dēdēšanas ceļš paliks starp abiem modeļa robežscenārijiem.

Ko tas neparāda: Fiksētu datumu visu augu, visas dzīvības, cilvēku civilizācijas, Zemes okeānu vai planētas beigām; vienu nepārtrauktu nākamo divu miljardu gadu simulāciju; vai jebkādu iemeslu mazināt mūsdienu cilvēku izraisīto klimata pārmaiņu nozīmi.

Galvenie ierobežojumi: Divdesmit deviņi līdzsvara stāvokļa gadījumi no vienas klimata modeļu saimes; iepriekš noteikti, nevis dinamiski sasaistīti dēdēšanas ceļi; mūsdienu ģeogrāfija; slāņa okeāns; fiksēts metāns; nulle ass slīpuma un ekscentricitātes; nav tieši aprakstītu augšņu, veģetācijas vai biosfēras atgriezeniskās saites; nenoteiktas karstuma un oglekļa dioksīda robežas; un liela modeļu rezultātu izkliede mitra un nekontrolējama siltumnīcas efekta apstākļu tuvumā.

Cik lielai vajadzētu būt lasītāja pārliecībai? Augsta pārliecība, ka pētījums paplašina ticamo modeļu diapazonu un identificē pieņēmumus, kas to nosaka. Vidēja pārliecība par skaitlisko diapazonu kā noderīgu robežu šī modeļa ietvaros. Zema pārliecība par jebkuru precīzu datumu, jo vistālākie galapunkti ir atkarīgi no apzināti galējiem klimata ceļiem un nenoteiktas bioloģijas.

Avoti

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