The Clean Paper

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

Hversu lengi getur jörðin haldist græn? Loftslagslíkan gefur bil, ekki dómsdagsdagsetningu

Tuttugu og níu þrívíðar loftslagshermanir setja mismunandi mörk á ljóstillífandi lífhvolf jarðar á bilinu um 1,35 til 1,87 milljarðar ára héðan í frá. Gildin ráðast af vísvitandi einfölduðum leiðum fyrir bergveðrun, hita og lægsta koltvísýringsmagn sem plöntur gætu notað. Þau spá ekki fyrir um hvenær allar plöntur, allt líf, siðmenning eða plánetan enda.

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

Hversu lengi getur jörðin haldist græn? Loftslagslíkan gefur bil, ekki dómsdagsdagsetningu

Lauf lifir innan þröngrar málamiðlunar. Það þarf ljós, vatn, koltvísýring og hitastig sem efnafræði þess þolir. Á mannlegum líftíma virðist sólin vera fasti þátturinn í þeirri málamiðlun. Á milljarði ára er hún það ekki.

Eftir því sem sólin eldist á meginröð verður hún hægt og rólega bjartari. Meira sólarljós hitar jörðina en reikistjarnan hefur langtímaviðbragð: efnahvörf milli regnvatns, koltvísýrings og silíkatbergs geta fjarlægt koltvísýring úr lofthjúpnum. Það veikir gróðurhúsaáhrif og vegur upp hluta hlýnunarinnar. Sama viðbragð og kælir jörðina getur að lokum svelt ljóstillífandi lífverur af kolefninu sem þær nota til að byggja lifandi vef.

Ný grein í Journal of Geophysical Research: Atmospheres spyr hvaða mörk gætu komið fyrst: of mikill hiti eða of lítill koltvísýringur. Svarið er ekki dagsetning þegar jörðin deyr. Yfir tvær vísvitandi einfaldar framtíðarleiðir liggja samþykkt mörk ljóstillífandi lífs á bilinu um **1,35 til 1,87 milljarðar ára héðan í frá**.

Bilið snýst um **gróður-lífhvolfið**: þann hluta lifandi kerfis jarðar sem viðhelst af ljóstillífandi lífverum, sérstaklega plöntum og öðru lífi sem breytir ljósi og koltvísýringi í lífrænt efni. Þetta er ekki spá um allar örverur. Þetta er ekki líftími mannlegrar siðmenningar. Þetta er ekki líftími plánetunnar.

Plánetuhitastillirinn hefur tvær óvissar stillingar

Meginóvissan er **silíkatveðrun**. Koltvísýringur leysist í regnvatni, hvarfast við silíkatberg og berst að lokum í átt að höfum og setlögum. Eldfjöll skila koltvísýringi aftur á jarðsögulegum tímakvarða. Saman mynda þessi ferli hluta kolefnis–silíkat hringrásarinnar, oft lýst sem hitastilli plánetunnar.

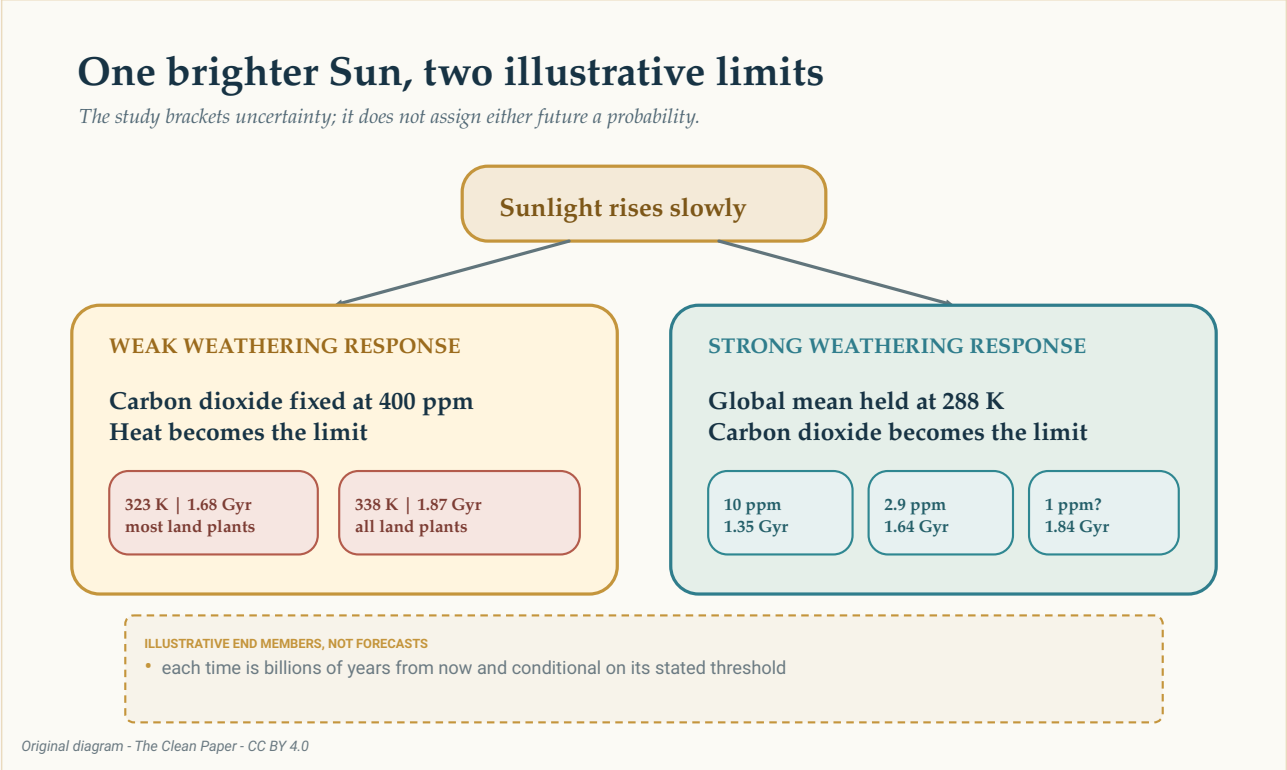
Í hlýrri, blautari heimi gæti veðrun hraðað og fjarlægt koltvísýring hraðar. En vísindamenn vita ekki hversu sterkt þetta viðbragð verður á jörðinni undir bjartari sól framtíðarinnar. Jacob Haqq-Misra og Eric Wolf völdu því ekki eina leið sem ætti að vera „rétt“. Þeir líkanuðu tvo **endapunkta**: vísvitandi öfgatilfelli sem eiga að ramma inn óvissuna.

- Í **veikri-veðrun endapunktinum** helst koltvísýringur lofthjúpsins í 400 hlutum á milljón á meðan bjartari sól hækkar hitastigið.
- Í **sterkri-veðrun endapunktinum** helst hnattrænt meðalhitastig yfirborðs við 288 kelvin, um 15 gráður á Celsíus, á meðan koltvísýringur er dreginn niður þegar sólskin eykst.

Hvorug leiðin er sett fram sem raunveruleg framtíð jarðar. Sú fyrri spyr hvað hiti myndi gera ef koltvísýringur héldist hár. Sú síðari spyr hvað kolefnisskortur myndi gera ef veðrun héldi hnattrænu meðalhitastigi nálægt því sem er í dag.

Hvernig getur veðrun virkað eins og hitastillir?

Hliðstæðan snýst um afturverkun, ekki bókstaflegan stillihnapp. Þegar hlýrra loftslag hraðar efnaveðrun getur meira af koltvísýringi lofthjúpsins endað í uppleystu efni, steindum og setlögum. Að fjarlægja þessa gróðurhúsalofttegund vinnur gegn hluta upphaflegu hlýnunarinnar. Á mjög löngum tímakvarða skilar eldvirkni koltvísýringi aftur.
Styrkur hvers hlekkjar ræðst af úrkomu, berskjaldaðri bergtegund, rofi, líffræði, flekahreyfingum og efnafræði hafsins. Þess vegna prófar greinin jaðarviðbrögð í stað þess að meðhöndla hitastillinn sem þekkta vél.



Greinin rammar óvissa framtíð inn með tveimur lýsandi endapunktum. Ef veðrun bregst veikt við ná hækkandi hitastig samþykktum mörkum landplantna. Ef hún bregst sterkt við nær fallandi koltvísýringur samþykktum mörkum ljóstillífunar. Þetta eru skilyrtar líkanleiðir, ekki líkur eða niðurtalningsdagsetningar.

The Clean Paper CC BY 4.0

Tuttugu og níu stöðugir líkanheimar, ekki ein tveggja milljarða ára kvikmynd

Rannsakendurnir notuðu ExoCAM, þrívítt hnattrænt loftslagslíkan, til að reikna **29 jafnvægisloftslög** yfir samsetningar aukins sólskins og minni koltvísýrings. Hvert tilfelli var keyrt í 70 líkanár. Hér er eitt líkanár ein hermd árstíðahringrás við fastar aðstæður: það er keyrslutími sem gefur gerviloftslaginu

tækifæri til að setjast, ekki eitt skref í ár-fyrir-ár spá um framtíð jarðar. Meðaltal síðustu 20 áranna var tekið eftir að hermda loftslagið hafði fengið tíma til að ná jafnvægi.

Þessi 29 tilfelli eru aðskildir líkanheimar. Hver keyrsla er einn punktur í neti og svarar „hvaða jafnvægisloftslag passar við þessa völdu samsetningu sólskins og koltvísýrings?“ Tölvan byrjaði ekki á jörðinni í dag og þróaði síðan samfellt lofthjúp, berg, höf og líf hennar næstu tvo milljarða ára. Höfundarnir raktu þess í stað tvær skematískar veðrunarleiðir í gegnum þessa fyrirfram reiknuðu punkta; leiðin milli punkta var ekki sjálf hermd.

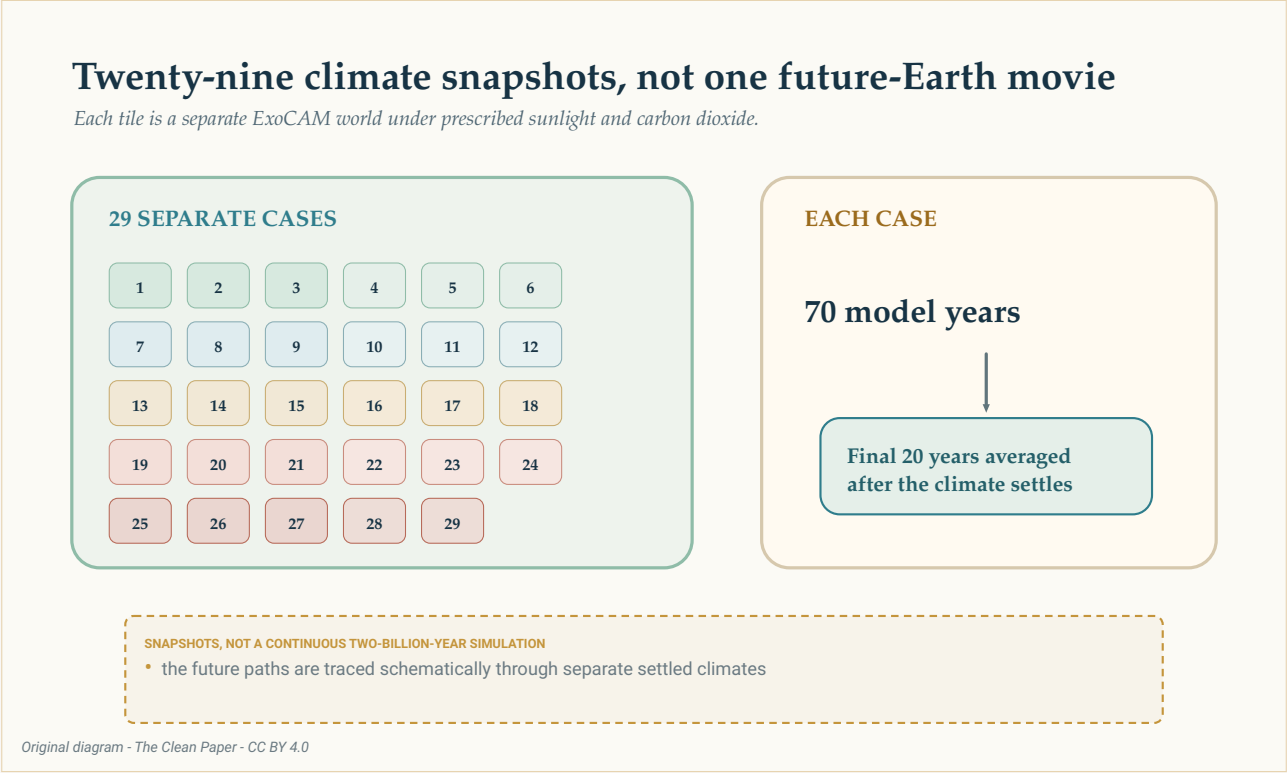
Taflan endurtekur samsetningar sólskins og koltvísýrings úr opinbera gagnasafni líkansins. Tilfellanúmerin eru lestraraðstoð bætt við hér í röð safnsins. **S/S0** er hlutfallslegur sólarfasti: innkomandi sólarorka í líkaninu deilt með gildi hennar í dag, S0. Gildið 1,2 merkir því 20 prósent meiri innkomandi sólarorku en í dag. **CO2 (ppm)** er blöndunarhlutfall koltvísýrings í lofthjúpi í sameindum á hverja milljón lofthjúpssameinda.

Tilfelli	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
29	1.2	0

Líkanjörðin er auðþekkjanleg en vísvitandi takmörkuð. Hún er jarðarstór og notar landafræði nútímans. Hún hefur einfaldað laghaf fremur en fullkomlega hringrásandi haf, loftþrýsting um það bil eins og á jörðinni í dag (eitt bar) og fast metan. Brautin er fullkomlega hringlaga (núll miðskekkja) og snúningsásinn hallar ekki (núll möndulhalli). Hún inniheldur hvorki bein jarðvegslíkön né gróður eða afturverkun frá breytilegu lífhvolfi. Mikilvægast er að loftslagslíkanið er ekki kvikt tengt bergveðrunarlíkani. Með öðrum orðum reiknar ExoCAM ekki veðrun, notar hana til að uppfæra koltvísýring og keyrir síðan næsta loftslag í afturverkunarlykkju. Rannsakendurnir fyrirskrifuðu tvær jaðarleiðir og rákust þær í gegnum 29-tilfella loftslagsnetið.

Hvað merkir „jafnvægi“ í loftslagslíkani?

Jafnvægistilfelli er líkanloftslag sem fær að setjast við eina valda sól og eitt valið lofthjúp. Veður breytist enn frá degi til dags og ári til árs inni í hermuninni, en langtímameðaltöl hætta að reka mikið.
Þetta er gagnlegt til að spyrja „hvaða loftslag passar þessum aðstæðum?“ Það er annað en að spá nákvæmlega fyrir um leiðina sem raunveruleg jörð fer frá einu ástandi í annað.



Hver reitur er aðskilin ExoCAM-loftslagskeyrsla í 70 líkanár, með meðaltali síðustu 20 ára. Rannsóknin tók 29 jafnvægisloftslög við fyrirskrifað sólskin og koltvísýring; hún hermdi ekki eina jörð í samfelldri þróun í tvo milljarða ára.

The Clean Paper CC BY 4.0

Endapunktur eitt: nóg af koltvísýringi, of mikill hiti

Í veikri-veðrun leiðinni helst koltvísýringur fastur við 400 hluta á milljón. Þegar sólarorka eykst verður hitinn takmarkandi þáttur.

Greinin notar tvö hnattræn meðalhitamörk úr eldri rannsóknum:

- Við **323 kelvin**, um **50 gráður á Celsíus** sem hnattrænt ársmeðaltal, er heimurinn meðhöndlaður sem of heitur fyrir flestar landplöntur. Líkanið nær þeim mörkum eftir um **1,68 milljarða ára**.
- Við **338 kelvin**, um **65 gráður á Celsíus** sem hnattrænt ársmeðaltal, er heimurinn meðhöndlaður sem of heitur fyrir allar landplöntur. Líkanið nær þeim mörkum eftir um **1,87 milljarða ára**.

Þetta eru samþykkt líffræðileg mörk, ekki algild hitastig þar sem allar ljóstillífandi lífverur bila endilega. Hnattrænt meðaltal felur líka mikinn svæðisbundinn mun. Rannsóknin skoðar sérstaklega hvar samsetningar hitastigs og vatns gætu haldist hagstæðar, en merking á loftslagskorti getur ekki skráð hvert framtíðarskjól eða aðlögun.

Endapunktur tvö: þolanlegt hitastig, of lítill koltvísýringur

Í sterkri-veðrun leiðinni er hnattrænt meðalhitastig haldið við 288 kelvin, um 15 gráður á Celsíus, á meðan koltvísýringur í lofthjúpnum fellur. Hér fer svarið eftir því hversu lítið kolefni mismunandi ljóstillífunarleiðir gætu notað.

- Við hefðbundin **10 hluta á milljón** mörk — 10 koltvísýringssameindir á hverja milljón lofthjúpssameinda — koma mörk C4-ljóstillífunar eftir um **1,35 milljarða ára**. C4-ljóstillífun er notuð af plöntum á borð við maís og sykurreyr og þéttir koltvísýring í kringum ensímið sem bindur hann.
- Með öðrum **2,9 hluta á milljón** C4-mörkum sem rædd eru í eldri vinnu færist þetta í um **1,64 milljarða ára**.
- Bráðabirgða **1 hluti á milljón** mörk, tengd mögulegri áframhaldandi lifun sumra CAM-plantna — plantna sem nota Crassulacean acid metabolism og aðskilja upptöku koltvísýrings að nóttu frá notkun hans að degi — eða vatnaplantna sem geta notað uppleyst bíkarbónat, færa mörkin í um **1,84 milljarða ára**.

Síðasta talan hefur stærsta líffræðilega fyrirvarann. Höfundarnir kalla eins-hluta-á-milljón mörkin beinlínis bráðabirgðamörk. Þau eru ekki tilraunalega staðfest lifunarmörk fyrir allar CAM-plöntur eða vatnagróður við framtíðaraðstæður jarðar.

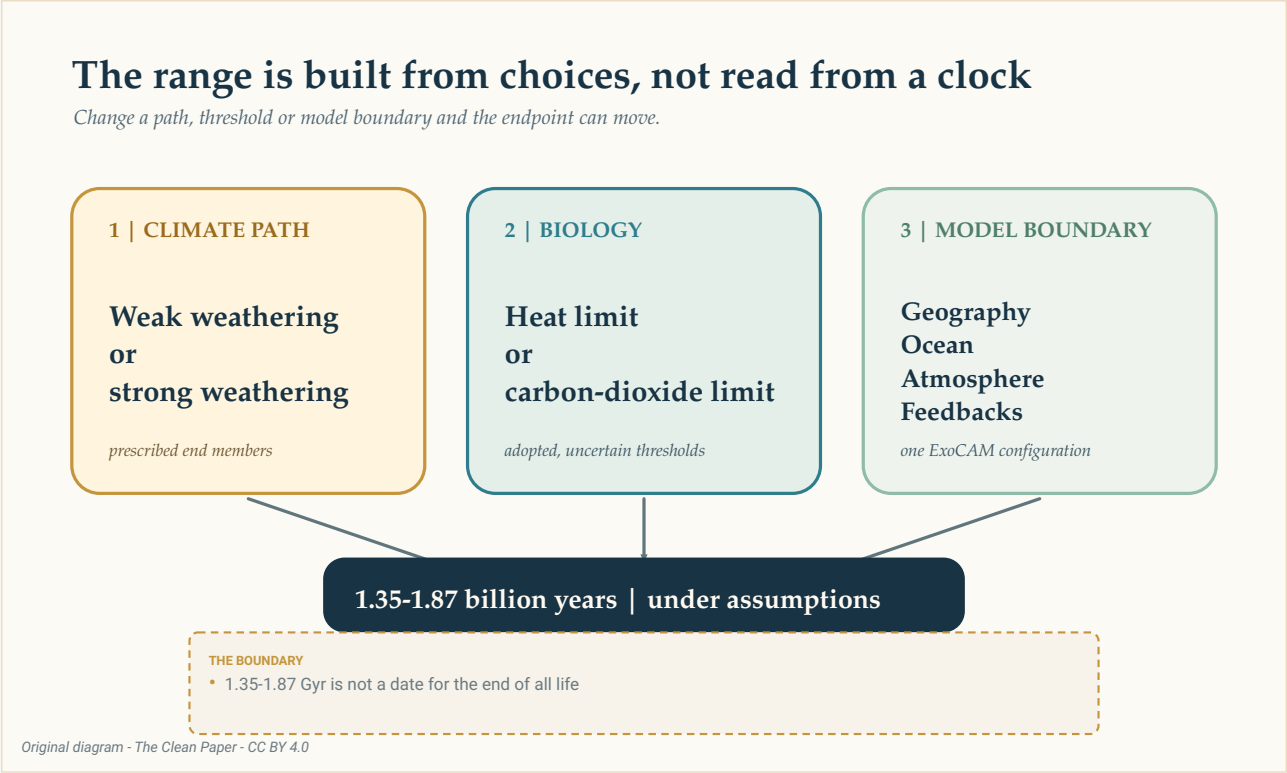
> **C3, C4 og CAM eru aðferðir, ekki stigveldi**
>
> Plöntur nota mismunandi lífefnafræðilegar leiðir til að fanga kolefni. **C3-ljóstillífun** er algengust. **C4-ljóstillífun**, notuð af plöntum á borð við maís og sykurreyr, þéttir koltvísýring við ensímið sem bindur kolefni og getur virkað betur þegar koltvísýringur er af skornum

> skammti. **Crassulacean acid metabolism (CAM)** aðskilur kolefnisupptöku og notkun milli nætur og dags og hjálpar mörgum plöntum að spara vatn.
> Þetta eru fjölskyldur aðferða með miklum mun milli tegunda, ekki röð „betri“ plantna. Mjög lág koltvísýringsmörk greinarinnar eru forsendur til að kanna möguleg mörk, ekki trygging fyrir því að framtíðarvistkerfi þróist til að nota þau.

Hvers vegna 1,86 milljarðar ára er ekki fyrningardagsetning

Fyrirsagnarmatið í greininni, um **1,86 milljarðar ára**, er meðaltal tveggja bjartsýnu efri endapunktanna: 1,84 milljarðar ára í koltvísýringstakmörkuðu leiðinni og 1,87 milljarðar í hitatakmörkuðu leiðinni. Það er þétt samantekt á tveimur ólíkum sviðsmyndum. Það er ekki þriðja líkananiðurstaðan með meiri nákvæmni og ekki besta-mat dagsetning.

Jafnvel breiðara bilið 1,35 til 1,87 milljarðar ára hefur ekki eina líkindamerkingu. Neðri og efri gildin ráðast af mismunandi veðrunarforsendum, mismunandi líffræðilegum mörkum og einni uppsetningu loftslagslíkans. Bilið mælir val rannsóknarinnar að minnsta kosti jafn mikið og tíma.



Bilið 1,35 til 1,87 milljarðar ára kemur aðeins fram eftir að veðrunarleið, líffræðileg mörk og líkanmörk hafa verið valin. Þetta er kort yfir forsendur, ekki klukka sem endar með útdauða alls lífs.

The Clean Paper CC BY 4.0

Önnur mörk gætu komið fyrr

Lengstu mötin á gróður-lífhvolfinu nálgast önnur og óviss mörk: rakan eða stjórnlausan gróðurhúsaheim sem gæti valdið miklu tapi á höfum. Loftslagslíkön eru mjög ósammála um hvenær slík ástand hefjast undir auknu sólskini, sérstaklega langt frá núverandi aðstæðum. Sum möt setja þau á undan bjartsýnustu ljóstillífunarmörkunum.

Þetta þýðir að ekki má lesa efri leiðina sem loforð um að jörðin haldi höfum sínum, kunnuglegum heimsálfum eða lífvænlegum yfirborðsskilyrðum þar til eftir 1,87 milljarða ára. Líkanið inniheldur heldur ekki framtíðarflekahreyfingar, breytingar á landflæmi, þróandi vistkerfi eða fullkvikt haf. Útreikningum þess á því hvernig lofthjúpurinn gleypir og geislar orku er einnig ýtt inn á svið mikils sólskins og afar lítils koltvísýrings þar sem líkön greinir á.

Þróunarfræðileg aðlögun og tæknileg inngrip koma fram í umræðu greinarinnar sem möguleikar. Þau eru ekki niðurstöður 29 loftslagshermana. Líkanið sýnir ekki framtíðarlífverur þróa eins-hluta-á-milljón ljóstillífunarleið og sýnir ekki siðmenningu stjórna lofthjúpnum í milljarð ára.

Þetta er ekki niðurstaða um loftslagskreppu dagsins í dag

Bjartnandi sól verkar yfir hundruð milljóna til milljarða ára. Nútíma hlýnun af mannavöldum kemur frá hratt vaxandi gróðurhúsalofttegundum yfir áratugi og aldir. Þetta eru ólíkir drifkraftar á gjörólíkum tímakvarða sem svara ólíkum spurningum.

Ekkert í þessari rannsókn veikir gögnin um núverandi loftslagsbreytingar eða mælir með að aðgerðum sé frestað. Lífhvolf sem gæti haldið einhverju ljóstillífandi lífi í einni fjarlægri líkansviðsmynd er ekki það sama og loftslag þar sem samfélög og vistkerfi dagsins í dag eru örugg.

Greinin er verðmæt vegna þess að hún gerir fjarlæga spurningu agaðri. Hún sýnir að eldri, einfaldari líkön gætu hafa hlýnað of mikið þegar sólskin jókst með föstum koltvísýringi og að ljóstillífandi líf gæti haft fleiri leiðir til að halda áfram en ein hefðbundin kolefnismörk gefa til kynna. Hún sýnir einnig hvers vegna hvert viðbótarbrot úr milljarði ára kemur með keðju forsendna.

Sólin sem nærir lauf er hægt að breytast. Hvort jörðin haldist græn í 1,35, 1,87 eða einhvern annan fjölda milljarða ára mun ráðast af því hvernig berg, vatn, lofthjúpur og líf bregðast saman. Heiðarlega niðurstaðan er ekki dagsetning. Hún er víðari sýn á málamiðlunina.

Í stuttu máli

Þrívíð loftslagsrannsókn spyr hversu lengi gróður- og ljóstillífandi lífhvolf jarðar gæti varað þegar sólin verður hægt bjartari. Rannsakendurnir reiknuðu 29 aðskilin jafnvægisloftslög og rákust tvö lýsandi jaðartilfelli í gegnum þau. Við veika veðrun og koltvísýring fastan við 400 hluta á milljón koma samþykkt hitamörk fyrir landplöntur eftir um 1,68 og 1,87 milljarða ára. Við sterka veðrun og hnat-

trænt meðalhitastig fast við 288 kelvin, um 15 gráður á Celsíus, koma samþykkt koltvísýringsmörk ljóstillífunar eftir um 1,35, 1,64 og, með bráðabirgðamörkum, 1,84 milljarða ára. Hin oft vitnaða tala 1,86 milljarðar ára er aðeins námundað meðaltal tveggja bjartsýnu efri endapunktanna. Þetta eru sviðsmyndaháð líkanbil, ekki dagsetning þegar jörðin, mannkynið eða allt líf endar. Líkanið notar fyrirskrifaðar leiðir, núverandi landafræði, laghaf og engin bein jarðveg–gróður eða loftslag–veðrun tengsl, og lengstu mötin nálgast óviss gróðurhúsa- og hafstapsmörk.

Raunsætt mat

Það sem greinin sýnir: Í þessari ExoCAM-uppsetningu hlýna þrívíð loftslög almennt minna undir auknu sólskini og föstum koltvísýringi en einfölduðu líkönin sem notuð eru til samanburðar. Yfir tvö fyrirskrifuð veðrunarendatilfelli og nokkur samþykkt líffræðileg mörk liggja mörk gróðurlífhvolfsins á bilinu um 1,35 til 1,87 milljarðar ára héðan í frá.

Það sem er trúverðugt en ekki staðfest: Að sumar CAM-plöntur eða vatnaplöntur sem nota uppleyst bíkarbónat gætu viðhaldið ljóstillífun nálægt einum hluta á milljón koltvísýrings í lofthjúpi; að aðlögun eða tækni geti lengt ljóstillífandi líf enn frekar; og að raunveruleg loftslag–veðrun leið haldist milli jaðartilfellanna tveggja.

Það sem hún sýnir ekki: Fasta dagsetningu fyrir endalok allra plantna, alls lífs, mannlegrar siðmenningar, hafanna eða plánetunnar; eina samfellda hermun næstu tveggja milljarða ára; eða nokkra ástæðu til að draga úr vægi núverandi loftslagsbreytinga af mannavöldum.

Helstu takmarkanir: Tuttugu og níu jafnvægistilfelli úr einni loftslagslíkanfjölskyldu; fyrirskrifaðar fremur en kvikt tengdar veðrunarleiðir; núverandi landafræði; laghaf; fast metan; núll möndulhalli og miðskekkja; enginn bein jarðvegur, gróður eða lífhvolfsendurverkun; óviss hita- og koltvísýringsmörk; og mikill ágreiningur líkana nálægt röku og stjórnlausu gróðurhúsaástandi.

Hversu mikið traust ætti almennur lesandi að hafa? Mikið traust á því að rannsóknin víkki trúverðugt líkanbil og auðkenni forsendurnar sem stjórna því. Hóflegt traust á tölulega bilinu sem gagnlegri afmörkun innan þessa líkans. Lítið traust á nákvæmri dagsetningu, því fjarlægustu endapunktarnir ráðast af vísvitandi öfgafullum loftslagsleiðum og óvissri líffræði.

Heimildir

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