The Clean Paper

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

Kui kaua saab Maa püsida rohelisena? Kliimamudel pakub vahemikke, mitte maailmalõpu kuupäeva

Kakskümmend üheksa kolmemõõtmelist kliimasimulatsiooni paigutavad Maa fotosünteesiva biosfääri erinevad piirid ligikaudu 1,35–1,87 miljardi aasta kaugusele tulevikku. Väärtused sõltuvad tahtlikult lihtsustatud radadest, mis kirjeldavad kivimite murenemist, kuumust ja kõige madalamat süsinikdioksiidi taset, mida taimed võiksid kasutada. Need ei ennusta, millal lõpevad kõik taimed, kogu elu, tsivilisatsioon või planeet.

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

Kui kaua saab Maa püsida rohelisena? Kliimamudel pakub vahemikke, mitte maailmalõpu kuupäeva

Leht elab üsna kitsastes tingimustes. Ta vajab valgust, vett, süsinikdioksiidi ja temperatuuri, mida tema keemia talub. Inimese eluea jooksul näib Päike selle kokkuleppe muutumatu osana. Miljardi aasta jooksul see nii ei ole.

Kui Päike põhijadal vananeb, muutub ta aeglaselt heledamaks. Rohkem päikesevalgust soojendab Maad, kuid planeedil on pikaajaline vastus: vihmavee, süsinikdioksiidi ja silikaatkivimite vahelised reaktsioonid võivad eemaldada atmosfäärist süsinikdioksiidi. See nõrgendab kasvuhooneefekti ja tasakaalustab osa soojenemisest. Sama protsess, mis planeeti jahutab, võib lõpuks jätta fotosünteesivad organismid ilma süsinikust, millest nad ehitavad eluskude.

Uus Journal of Geophysical Research: Atmospheres'i artikkel küsib, kumb piir võib saabuda varem: liiga suur kuumus või liiga vähe süsinikdioksiidi. Vastus ei ole kuupäev, millal Maa sureb. Kahe tahtlikult lihtsustatud tulevikutee puhul jäävad uuringus kasutatud fotosünteesiva elu piirid ligikaudu **1,35–1,87 miljardi aasta kaugusele tulevikku**.

See vahemik puudutab **taimset ehk fotosünteesivat biosfääri**: Maa elussüsteemi osa, mida kannavad fotosünteesivad organismid, eelkõige taimed ja muu elu, mis muudab valguse ja süsinikdioksiidi bioloogiliseks aineks. See ei ole prognoos iga mikroobi kohta. See ei ole inimtsivilisatsiooni eluiga. See ei ole planeedi eluiga.

Planeedi termostaadil on kaks ebakindlat seadistust

Peamine ebakindlus on **silikaatkivimite murenemine**. Süsinikdioksiid lahustub vihmavees, reageerib silikaatkivimitega ning kandub lõpuks ookeanidesse ja setetesse. Vulkaanid tagastavad geoloogilise aja jooksul süsinikdioksiidi atmosfääri. Need protsessid moodustavad osa karbonaadi-silikaadi ringest, mida kirjeldatakse sageli planeedi termostaadina.

Soojemas ja niiskemas maailmas võib murenemine kiireneda ning eemaldada süsinikdioksiidi kiiremini. Kuid teadlased ei tea, kui tugevalt hakkab see vastus Maad tulevikus heledama Päikese all valitsema. Seetõttu ei valinud Jacob Haqq-Misra ja Eric Wolf üht väidetavalt õiget rada. Nad modelleerisid kaks **äärmusjuhtu**: tahtlikult äärmuslikud variandid, millega ebakindlust piiristada.

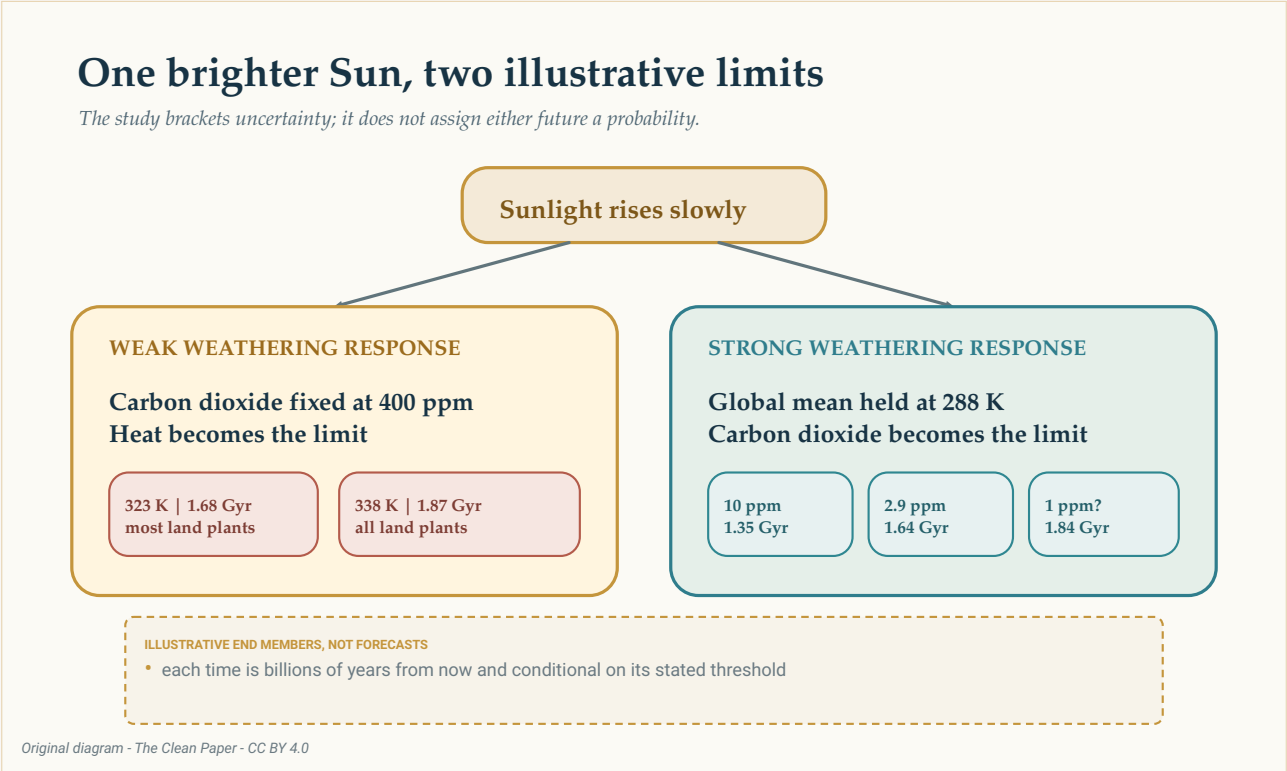
- **Nõrga murenemise äärmusjuhul** püsib atmosfääri süsinikdioksiid 400 miljondikosal, samal ajal kui heledamaks muutuv Päike tõstab temperatuuri.
- **Tugeva murenemise äärmusjuhul** püsib globaalne keskmine pinnatemperatuur 288 kelvinil ehk umbes 15 Celsiuse kraadil, samal ajal kui päikesevalguse suurenedes süsinikdioksiidi hulk väheneb.

Kumbagi haru ei esitata Maa tegeliku tulevikuna. Esimene küsib, mida teeks kuumus, kui süsinikdioksiidi tase püsiks kõrge. Teine küsib, mida teeks süsinikupuudus, kui murenemine hoiaks globaalse

temperatuuri tänapäevase keskmise lähedal.

Kuidas saab murenemine toimida termostaadina?

Analoogia puudutab tagasisidet, mitte sõna otseses mõttes juhtnuppu. Kui soojem kliima kiirendab keemilist murenemist, võib rohkem atmosfääri süsinikdioksiidi jõuda lahustunud ainete, mineraalide ja setete hulka. Selle kasvuhoonegaasi eemaldamine töötab osaliselt algse soojenemise vastu. Väga pikkadel aegskaaladel toob vulkaaniline gaasieraldus süsinikdioksiidi tagasi.
Iga lüli tugevus sõltub sademetest, paljanduvast kivimist, erosioonist, bioloogiast, tektoonikast ja ookeanikeemiast. Seepärast testib artikkel piirjuhtumite vastuseid, selle asemel et käsitleda termostaati tuntud masinana.



Artikkel piiristab ebakindlat tulevikku kahe näitliku äärmusjuhuga. Kui murenemine reageerib nõrgalt, jõuab kasvav kuumus maismaataimede jaoks kasutatud piirväärtusteni. Kui murenemine reageerib tugevalt, jõuab langev süsinikdioksiid fotosünteesi jaoks kasutatud piirväärtusteni. Need on tingimuslikud mudeliharud, mitte tõenäosused ega loendused mingi tähtpäevani.

The Clean Paper CC BY 4.0

Kakskümmend üheksa tasakaalustunud mudelmaailma, mitte üks kahe miljardi aasta pikkune film

Teadlased kasutasid ExoCAM-i, kolmemõõtmelist globaalset kliimamudelit, et arvutada **29 püsiseisundi kliimat** tugevama päikesevalguse ja väiksema süsinikdioksiidisisalduse eri kombinatsioonides. Iga juhtumit käitati 70 mudeliaastat. Siin tähendab üks mudeliaasta üht simuleeritud aastatsüklit fikseeritud tingimustes: see on arvutusaeg, mille jooksul lastakse tehislikul kliimal tasakaalustuda, mitte üks samm Maa tuleviku aasta-aastalt prognoosis. Pärast seda, kui simuleeritud kliimal oli olnud aega stabiliseeruda, võeti viimase 20 aasta keskmine.

Need 29 juhtumit on eraldiseisvad mudelmaailmad. Iga simulatsioon on üks punkt ruudustikus, mis vastab küsimusele: „Milline tasakaalustunud kliima sobib selle valitud päikesevalguse ja süsinikdioksiidi paariga?" Arvuti ei alustanud tänase Maaga ega arendanud selle atmosfääri, kivimeid, ookeane ja elusolendeid pidevalt järgmise kahe miljardi aasta jooksul. Autorid jälgisid selle asemel kahte skemaatilist murenemisteed läbi eelnevalt arvutatud punktide; punktidevahelist rada ennast ei simuleeritud.

Tabel kordab päikesevalguse ja süsinikdioksiidi kombinatsioone ametlikust mudeliandmete arhiivist. Juhtumite ID-d on siin lugemise hõlbustamiseks lisatud arhiivi järjekorras. **S/S0** on suhteline päikesekonstant: mudelis kasutatud saabuv päikeseenergia jagatuna selle tänapäevase väärtusega S0. Seega tähendab väärtus 1.2 tänasega võrreldes 20 protsenti rohkem saabuvat päikeseenergiat. **CO2 (ppm)** on atmosfääri süsinikdioksiidi segusuhe molekulides miljoni atmosfäärimolekuli kohta.

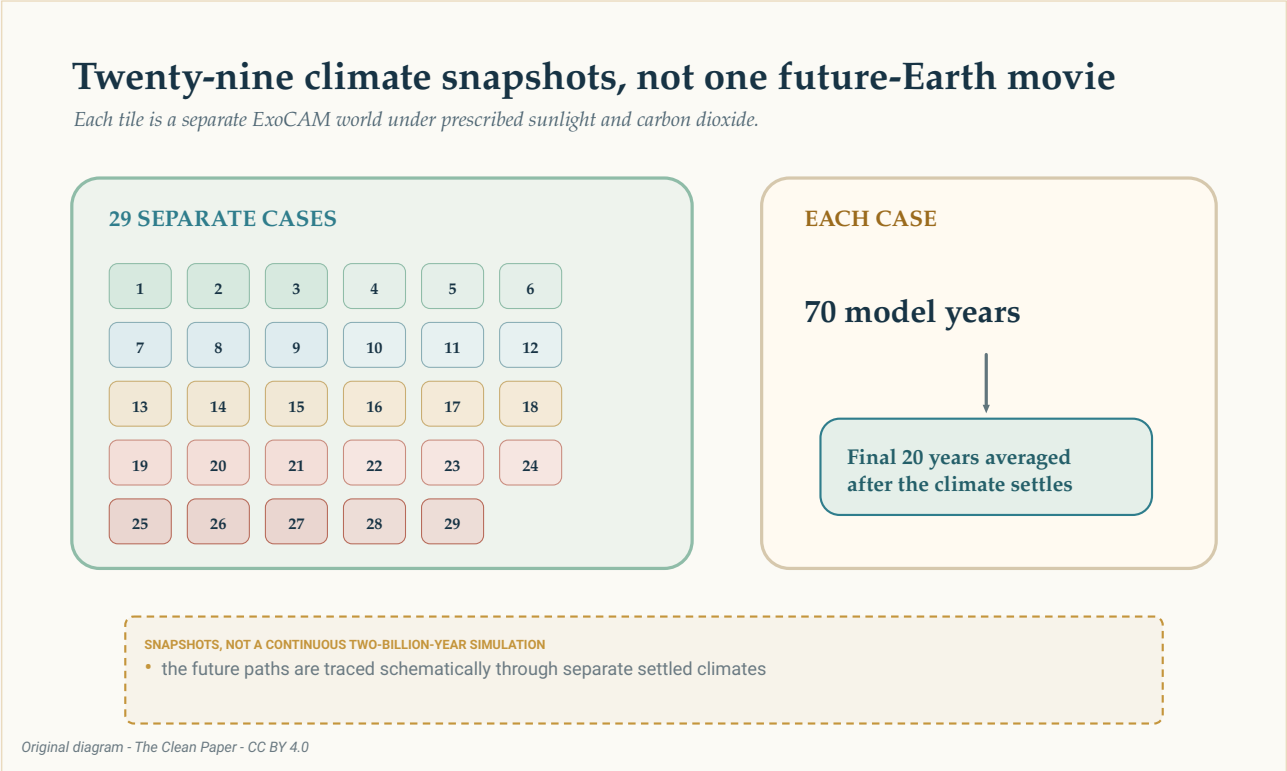
Juhtumi ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

Juhtumi ID	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

Mudel-Maa on äratuntav, kuid tahtlikult piiratud. See on Maa suurune ja kasutab tänapäevast geograafiat. Täielikult ringleva ookeani asemel on selles lihtsustatud segakihiga ookean, atmosfäärirõhk on seatud ligikaudu Maa praegusele väärtusele (üks baar) ning metaani hulk on fikseeritud. Orbiit on täiuslikult ringikujuline (ekstsentrilisus null) ja pöörlemistelg ei ole kallutatud (obliiksus null). Mudelis ei ole selgesõnaliselt mulda, taimestikku ega muutuva biosfääri tagasisidet. Kõige olulisem on see, et kliimamudel ei ole dünaamiliselt ühendatud kivimite murenemise mudeliga. Teisisõnu ei arvuta ExoCAM murenemist, ei kasuta seda süsinikdioksiidi uuendamiseks ega käivita seejärel järgmist kliimat tagasisideahelas. Teadlased määrasid hoopis ette kaks piiravat rada ja jälgisid neid läbi 29 juhtumist koosneva kliimaruudustiku.

Mida tähendab kliimamudelis „püsiseisund"?

Püsiseisundi juhtum on mudelkliima, millel lastakse ühe valitud Päikese ja atmosfääri tingimustes tasakaalustuda. Ilm muutub simulatsioonis endiselt päevast päeva ja aastast aastasse, kuid pikaajalised keskmised ei triivi enam tugevalt.
See on kasulik küsimuse jaoks „milline kliima sobib nende tingimustega?". See on midagi muud kui täpse raja ennustamine, mida mööda päris Maa liigub ühest tingimuste kogumist järgmisse.



Iga paan on eraldi ExoCAM-i kliimasimulatsioon, mida käitati 70 mudeliaastat ja mille puhul võeti viimase 20 aasta keskmine. Uuring valis etteantud päikesevalguse ja süsinikdioksiidi tingimuste seast 29 tasakaalustunud kliimat; see ei simuleerinud üht pidevalt arenevat Maad kahe miljardi aasta vältel.

The Clean Paper CC BY 4.0

Äärmusjuht üks: süsinikdioksiidi piisab, kuumust on liiga palju

Nõrga murenemise harus püsib süsinikdioksiid 400 miljondikosal. Päikesekiirguse suurenedes muutub piiravaks teguriks kuumus.

Artikkel kasutab varasematest töödest pärinevat kahte globaalse keskmise temperatuuri piirväärtust:

- **323 kelvini** juures ehk umbes **50 Celsiuse kraadi** globaalse aasta keskmisena käsitletakse maailma enamiku maismaataimede jaoks liiga kuumana. Mudel jõuab selle piirini umbes **1,68 miljardi aasta pärast**.
- **338 kelvini** juures ehk umbes **65 Celsiuse kraadi** globaalse aasta keskmisena käsitletakse maailma kõigi maismaataimede jaoks liiga kuumana. Mudel jõuab selle piirini umbes **1,87 miljardi aasta pärast**.

Need on uuringus kasutatud bioloogilised piirid, mitte universaalsed temperatuurid, mille juures iga fotosünteesiv organism tingimata lakkab toimimast. Globaalne keskmine peidab ka suuri piirkondlikke erinevusi. Uuring vaatleb eraldi, kus temperatuuri ja vee kombinatsioonid võiksid jääda sobi-

vaks, kuid kliimakaardi silt ei suuda kataloogida iga tulevast pelgupaika ega kohanemist.

Äärmusjuht kaks: temperatuur on talutav, süsinikdioksiidi liiga vähe

Tugeva murenemise harus hoitakse globaalset keskmist pinnatemperatuuri 288 kelvinil ehk umbes 15 Celsiuse kraadil, samal ajal kui atmosfääri süsinikdioksiidi hulk langeb. Siin sõltub vastus sellest, kui vähese süsinikuga erinevad fotosünteesirajad toime võivad tulla.

- Traditsioonilise **10 miljondikosa** piiri juures — 10 süsinikdioksiidi molekuli iga miljoni atmosfäärimolekuli kohta — saabub C4-fotosünteesi piir umbes **1,35 miljardi aasta pärast**. C4-fotosünteesi kasutavad muu hulgas mais ja suhkruroog ning see koondab süsinikdioksiidi seda siduva ensüümi ümber.
- Varasemates töödes käsitletud alternatiivne C4 piir **2,9 miljondikosa** nihutab selle umbes **1,64 miljardi aasta** kaugusele.
- Esialgne **1 miljondikosa** piir, mida seostatakse mõnede CAM-taimede võimaliku püsimisega — need kasutavad krossulhappe metabolismi, mis eraldab öise süsinikdioksiidi sidumise selle päevasest kasutamisest — või veetaimedega, mis suudavad kasutada lahustunud vesinikkarbonaati, nihutab piiri umbes **1,84 miljardi aasta** kaugusele.

Viimane arv sisaldab kõige suuremat bioloogilist mööndust. Autorid nimetavad ühe miljondikosa piiri selgesõnaliselt esialgseks. See ei ole eksperimentaalselt kinnitatud ellujäämispiir kõigile CAM-taimedele ega veetaimestikule tulevase Maa tingimustes.

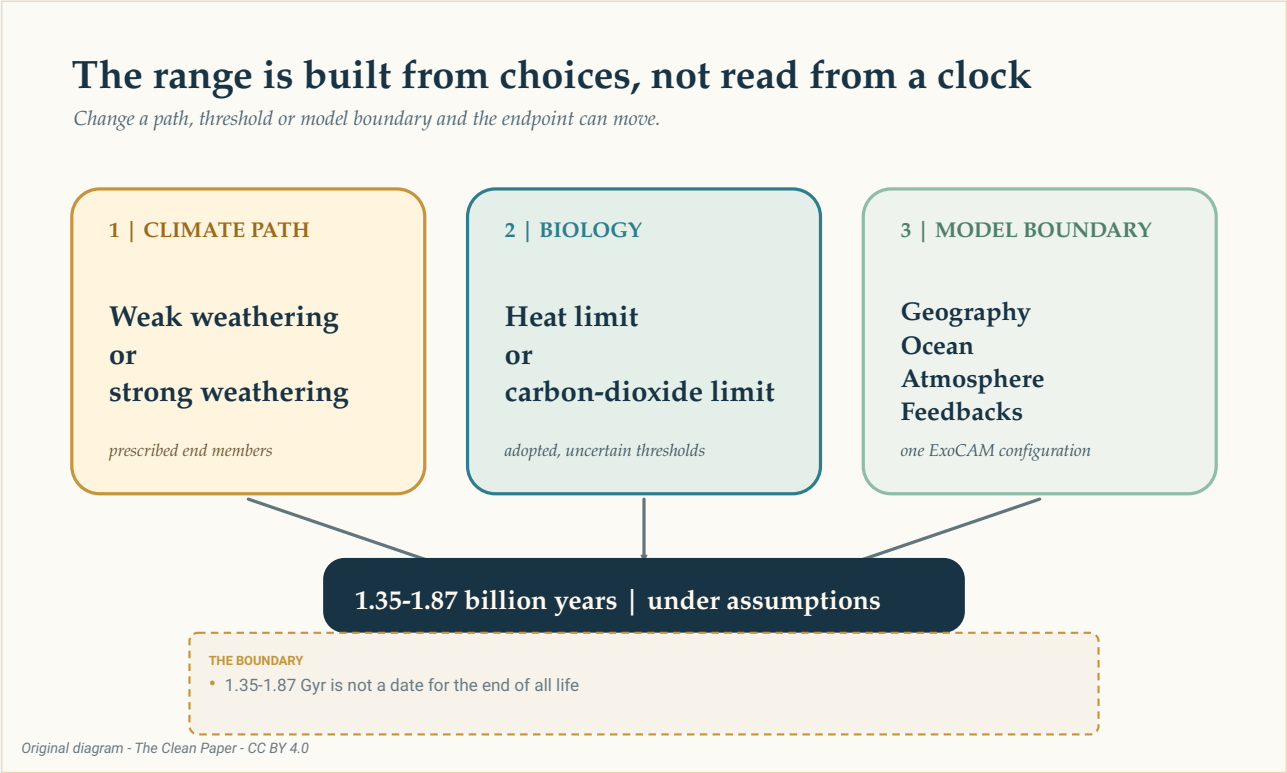
> **C3, C4 ja CAM on strateegiad, mitte paremusjärjestus**
>
> Taimed kasutavad süsiniku sidumiseks erinevaid biokeemilisi radu. **C3-fotosüntees** on kõige tavalisem. **C4-fotosüntees**, mida kasutavad muu hulgas mais ja suhkruroog, koondab süsinikdioksiidi süsinikku siduva ensüümi ümber ning võib töötada paremini siis, kui süsinikdioksiidi on vähe. **Krossulhappe metabolism (CAM)** eraldab süsiniku sidumise ja kasutamise öö ning päeva vahel, aidates paljudel taimedel vett säästa.
> Need on strateegiate perekonnad, milles leidub liikide vahel palju erinevusi, mitte järjestikused „paremate" taimede astmed. Artiklis kasutatud väga madalad süsinikdioksiidi piirid on eeldused võimalike piiride uurimiseks, mitte tagatis, et tulevane ökosüsteem areneb neid kasutama.

Miks 1,86 miljardit aastat ei ole aegumiskuupäev

Artikli pealkirjadesse jõudnud hinnang umbes **1,86 miljardit aastat** on kahe optimistliku ülemise otsapunkti keskmine: 1,84 miljardit aastat süsinikdioksiidiga piiratud harus ja 1,87 miljardit aastat

kuumusega piiratud harus. See on kahe erineva stsenaariumi kompaktne kokkuvõte. See ei ole kolmas, suurema täpsusega mudelitulemus ega parim hinnanguline kuupäev.

Isegi laiem vahemik 1,35–1,87 miljardit aastat ei kanna üht kindlat tõenäosust. Selle alumine ja ülemine väärtus sõltuvad erinevatest murenemise eeldustest, erinevatest bioloogilistest piiridest ja ühest kliimamudeli seadistusest. Vahemik mõõdab sama palju katsevalikuid kui aega.



Vahemik 1,35–1,87 miljardit aastat tekib alles pärast murenemistee, bioloogilise piiri ja mudeli piirtingimuste valimist. See on eelduste kaart, mitte kell, mis lõpeb kogu elu väljasuremisega.

The Clean Paper CC BY 4.0

Teised piirid võivad saabuda varem

Kõige pikemad taimse biosfääri hinnangud lähenevad eraldi ja ebakindlale piirile: niiskele või kontrollimatule kasvuhooneefektile, mis võiks põhjustada suure osa ookeanivee kadumise. Kliimamudelid erinevad märgatavalt selles, millal sellised seisundid kasvava päikesevalguse all algavad, eriti tänapäevast väga kaugetes tingimustes. Mõned hinnangud paigutavad need enne kõige optimistlikumat fotosünteesi piiri.

See tähendab, et ülemist haru ei saa lugeda lubadusena, et Maa säilitab oma ookeanid, tuttavad mandrid või elamiskõlblikud pinnatingimused veel 1,87 miljardit aastat. Mudel ei hõlma ka tulevast laamtektoonikat, maismaa pindala muutusi, arenevaid ökosüsteeme ega täielikult dünaamilist ookeani. Arvutused selle kohta, kuidas atmosfäär energiat neelab ja kiirgab, viiakse samuti tugeva päikesevalguse ja äärmiselt madala süsinikdioksiidi tingimustesse, kus eri mudelid lahknevad.

Evolutsiooniline kohanemine ja tehnoloogiline sekkumine esinevad artikli arutelus võimalustena. Need ei ole 29 kliimasimulatsiooni väljundid. Mudel ei näita, et tulevased organismid arendavad välja ühe miljondikosa juures toimiva fotosünteesiraja, ega seda, et mõni tsivilisatsioon haldab atmosfääri miljardi aasta jooksul.

See ei ole tulemus tänapäeva kliimakriisi kohta

Päikese heledamaks muutumine toimub sadade miljonite kuni miljardite aastate jooksul. Tänapäevane inimtekkeline soojenemine tuleneb kasvuhoonegaaside kiirest suurenemisest aastakümnete ja sajandite jooksul. Need on erinevad mõjurid, radikaalselt erinevatel ajaskaaladel ning vastavad erinevatele küsimustele.

Miski selles uuringus ei nõrgenda tõendeid praeguse kliimamuutuse kohta ega anna põhjust tegutsemist edasi lükata. Biosfäär, milles mõni fotosünteesiv elu võiks ühe kauge mudelistsenaariumi korral püsida, ei ole sama mis kliima, milles tänapäeva ühiskonnad ja ökosüsteemid on kaitstud.

Artikkel on väärtuslik, sest muudab ühe väga kauge küsimuse rangemaks. See näitab, et varasemad ja lihtsamad mudelid võisid hinnata soojenemist liiga suureks, kui päikesevalgus suurenes, kuid süsinikdioksiidi hulk jäeti fikseerituks, ning et fotosünteesival elul võib püsimiseks olla rohkem teid, kui üks kanooniline süsinikupiir vihjab. Samuti näitab see, miks iga lisanduv murdosa miljardist aastast tuleb koos eelduste ahelaga.

Päike, mis lehte toidab, muutub aeglaselt. See, kas Maa püsib rohelisena veel 1,35, 1,87 või mingi muu arvu miljardeid aastaid, sõltub kivimite, vee, atmosfääri ja elu ühisest vastusest. Aus tulemus ei ole kuupäev. See on avaram vaade sellele haprale kokkuleppele.

Lühidalt

Kolmemõõtmeline kliimauuring küsib, kui kaua võiks Maa taimne ehk fotosünteesiv biosfäär püsida, kui Päike aeglaselt heledamaks muutub. Teadlased arvutasid 29 eraldiseisvat püsiseisundi kliimat ja jälgisid läbi nende kahte näitlikku äärmusjuhtu. Nõrga murenemise korral, kui süsinikdioksiid on fikseeritud 400 miljondikosale, saabuvad maismaataimede jaoks kasutatud kuumuspiirid umbes 1,68 ja 1,87 miljardi aasta pärast. Tugeva murenemise korral, kui globaalne keskmine temperatuur on fikseeritud 288 kelvinile ehk umbes 15 Celsiuse kraadile, saabuvad fotosünteesi jaoks kasutatud süsinikdioksiidi piirid umbes 1,35, 1,64 ja esialgse piirväärtuse kasutamisel 1,84 miljardi aasta pärast. Sageli tsiteeritud 1,86 miljardit aastat on vaid kahe optimistliku ülemise otsapunkti ümardatud keskmine. Need on stsenaariumist sõltuvad mudelivahemikud, mitte kuupäev, mil Maa, inimkond või kogu elu lõpeb. Mudel kasutab etteantud radu, tänapäevast geograafiat, lihtsustatud segakihiga ookeani ning ei sisalda otsest mulla-taimestiku ega kliima-murenemise seost; kõige pikemad hinnangud lähenevad ka ebakindlatele kasvuhooneefekti ja ookeanikao piiridele.

Ilustamata kontroll

Mida artikkel näitab: Selles ExoCAM-i seadistuses soojenevad kolmemõõtmelised kliimad kasvava päikesevalguse ja fikseeritud süsinikdioksiidi korral üldiselt vähem kui võrdluseks kasutatud lihtsustatud mudelites. Kahe etteantud murenemise äärmusjuhu ja mitme kasutatud bioloogilise piirväärtuse korral jäävad taimse biosfääri piirid ligikaudu 1,35–1,87 miljardi aasta kaugusele tulevikku.

Mis on usutav, kuid tõendamata: Et mõned CAM-taimed või lahustunud vesinikkarbonaati kasutavad veetaimed võiksid fotosünteesida atmosfääri süsinikdioksiidi sisalduse juures, mis on lähedal ühele miljondikosale; et kohanemine või tehnoloogia võiks fotosünteesiva elu püsimist veel pikendada; ning et tegelik kliima ja murenemise rada jääb kahe mudeli äärmusjuhu vahele.

Mida see ei näita: Kindlat kuupäeva kõigi taimede, kogu elu, inimtsivilisatsiooni, Maa ookeanide või planeedi lõpu kohta; üht katkematut simulatsiooni järgmisest kahest miljardist aastast; ega mingit põhjust tänapäeva inimtekkelist kliimamuutust alahinnata.

Peamised piirangud: Kakskümmend üheksa püsiseisundi juhtumit ühest kliimamudelite perekonnast; etteantud, mitte dünaamiliselt seotud murenemisteed; tänapäevane geograafia; lihtsustatud segakihiga ookean; fikseeritud metaan; null-obliiksus ja null-ekstsentrilisus; puuduvad otsesed mullad, taimestik ja biosfääri tagasiside; ebakindlad kuumuse ja süsinikdioksiidi piirväärtused; ning mudelite suur lahknevus niiske ja kontrollimatu kasvuhooneefekti lähedal.

Kui kindel võiks tavalugeja selles olla? Suur kindlus selles, et uuring laiendab usutavat mudelivahemikku ja toob välja seda kontrollivad eeldused. Mõõdukas kindlus arvulise vahemiku suhtes kui kasuliku piiri suhtes selle mudeli sees. Väike kindlus mis tahes täpse kuupäeva suhtes, sest kõige kaugemad otsapunktid sõltuvad tahtlikult äärmuslikest kliimaradadest ja ebakindlast bioloogiast.

Allikad

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