The Clean Paper

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

Meddig maradhat zöld a Föld? Egy klímamodell tartományokat ad, nem világvége-dátumot

Huszonkilenc háromdimenziós klímaszimuláció a Föld fotoszintetikus bioszférájára különböző korlátokat helyez nagyjából 1,35–1,87 milliárd év múlva. Az értékek a kőzetmállás, a hőség és a növények által még használható legalacsonyabb szén-dioxid-szintek szándékosan leegyszerűsített útvonalaitól függenek. Nem jósolják meg, mikor ér véget minden növény, minden élet, a civilizáció vagy a bolygó.

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

Meddig maradhat zöld a Föld? Egy klímamodell tartományokat ad, nem világvége-dátumot

Egy levél szűk kompromisszum keretei között él. Fényre, vízre, szén-dioxidra és olyan hőmérsékletre van szüksége, amelyet a kémiája elvisel. Egy emberöltő alatt a Nap e kompromisszum állandó részének tűnik. Egymilliárd év alatt azonban nem az.

Ahogy a Nap öregszik a fősorozaton, lassan fényesebbé válik. A több napfény melegíti a Földet, de a bolygónak van egy hosszú távú válasza: az esővíz, a szén-dioxid és a szilikátos kőzetek közötti reakciók eltávolíthatják a szén-dioxidot a légkörből. Ez gyengíti az üvegházhatást, és részben ellensúlyozza a felmelegedést. Ugyanez a bolygót hűtő válasz végül megfoszthatja a fotoszintetizáló szervezeteket attól a széntől, amelyből élő szövetet építenek.

Egy új Journal of Geophysical Research: Atmospheres tanulmány azt kérdezi, melyik korlát érkezhet el előbb: a túl nagy hőség vagy a túl kevés szén-dioxid. A válasz nem egy dátum, amikor a Föld meghal. Két szándékosan leegyszerűsített jövőbeli út mentén a fotoszintetikus életre alkalmazott korlátok nagyjából **1,35–1,87 milliárd év múlva** következnek be.

Ez a tartomány a **vegetatív bioszféráról** szól: a Föld élő rendszerének arról a részéről, amelyet fotoszintetizáló szervezetek tartanak fenn, különösen növények és más élőlények, amelyek fényt és szén-dioxidot alakítanak biológiai anyaggá. Nem minden mikroba jövőjének előrejelzése. Nem az emberi civilizáció élettartama. Nem a bolygó élettartama.

A bolygó termosztátjának két bizonytalan beállítása van

A központi bizonytalanság a **szilikátos mállás**. A szén-dioxid feloldódik az esővízben, reagál a szilikátos kőzetekkel, majd végül az óceánok és üledékek felé szállítódik. Geológiai időskálán a vulkánok szén-dioxidot juttatnak vissza. Ezek a folyamatok együtt alkotják a karbonát–szilikát ciklus egy részét, amelyet gyakran bolygói termosztátként írnak le.

Melegebb, nedvesebb világban a mállás felgyorsulhat és gyorsabban távolíthatja el a szén-dioxidot. A tudósok azonban nem tudják, milyen erősen szabályozza majd ez a válasz a Földet egy fényesebb jövőbeli Nap alatt. Jacob Haqq-Misra és Eric Wolf ezért nem választott egyetlen, állítólag helyes pályát. Két **szélső esetet** modelleztek: szándékosan szélsőséges eseteket a bizonytalanság keretezésére.

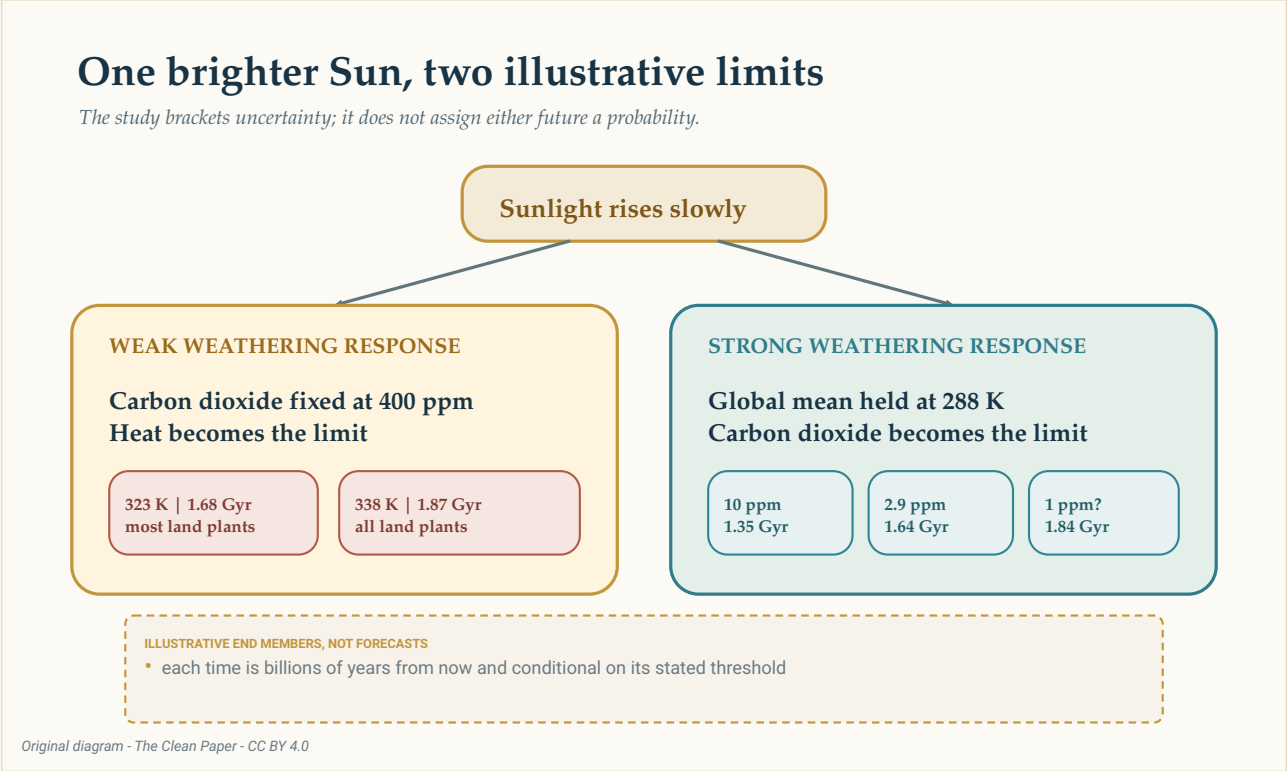
- A **gyenge mállású szélső esetben** a légköri szén-dioxid 400 ppm marad, miközben a fényesedő Nap emeli a hőmérsékletet.
- Az **erős mállású szélső esetben** a globális felszíni átlaghőmérséklet 288 kelvin, körülbelül 15 Celsius-fok marad, miközben a növekvő napsugárzással a szén-dioxid mennyisége csökken.

Egyik ágat sem a Föld tényleges jövőjeként mutatják be. Az első azt kérdezi, mit tenne a hőség, ha a szén-dioxid magas maradna. A második azt kérdezi, mit tenne a szénhiány, ha a mállás a globális hőmérsékletet a mai átlag közelében tartaná.

Hogyan működhet a mállás termosztátként?

A hasonlat visszacsatolásról szól, nem szó szerinti szabályozógombról. Amikor a melegebb éghajlat felgyorsítja a kémiai mállást, több légköri szén-dioxid kerülhet oldott anyagokba, ásványokba és üledékekbe. Ennek az üvegházhatású gáznak az eltávolítása ellensúlyozza az eredeti felmelegedés egy részét. Nagyon hosszú időskálán a vulkáni kigázosodás szén-dioxidot juttat vissza.

Az egyes kapcsolatok erőssége a csapadéktól, a felszínen levő kőzettől, az eróziótól, a biológiától, a tektonikától és az óceánkémiától függ. Ezért tesztel a tanulmány határeseteket ahelyett, hogy a termosztátot ismert gépként kezelné.



A tanulmány két szemléltető szélső esettel keretezi a bizonytalan jövőt. Ha a mállás gyengén reagál, a növekvő hőség eléri a szárazföldi növényekre alkalmazott küszöböket. Ha erősen reagál, a csökkenő szén-dioxid éri el a fotoszintézishez alkalmazott küszöböket. Ezek feltételes modellágak, nem valószínűségek vagy visszaszámlálási dátumok.

The Clean Paper CC BY 4.0

Huszonkilenc beállt modellvilág, nem egy kétmilliárd éves film

A kutatók az ExoCAM háromdimenziós globális klímamodellt használták **29 egyensúlyi klíma** kiszámítására az erősebb napsugárzás és az alacsonyabb szén-dioxid különböző kombinációiban. Minden esetet 70 modellévig futtattak. Itt egy modellév egy rögzített körülmények közötti szimulált éves ciklus: futási idő, amely arra szolgál, hogy a mesterséges klíma beálljon, nem egy lépés a Föld jövőjének évről évre történő előrejelzésében. A szimulált klíma beállása után az utolsó 20 évet átlagolták.

Ez a 29 eset különálló modellvilág. Minden futtatás a rács egy pontja, amely arra válaszol: „milyen beállt klíma illik ehhez a kiválasztott napsugárzás–szén-dioxid párhoz?” A számítógép nem a mai Földdel indult, majd folyamatosan fejlesztette tovább légkörét, kőzeteit, óceánjait és élőlényeit a következő kétmilliárd évre. A szerzők ehelyett a két sematikus mállási útvonalat vezették végig az előre kiszámított pontokon; a pontok közötti útvonalat önmagában nem szimulálták.

A táblázat a hivatalos modelladat-archívumban szereplő napsugárzás- és szén-dioxid-kombinációkat reprodukálja. Az esetazonosítókat itt olvasási segítségként, az archívum sorrendjében adtuk hozzá. Az **S/S0** a relatív napállandó: a modellben használt beérkező napenergia osztva a mai S0 értékével. Az 1.2 tehát a mainál 20 százalékkal nagyobb beérkező napenergiát jelent. A **CO2 (ppm)** a légköri szén-dioxid keverési aránya egymillió légköri molekulára jutó molekulákban.

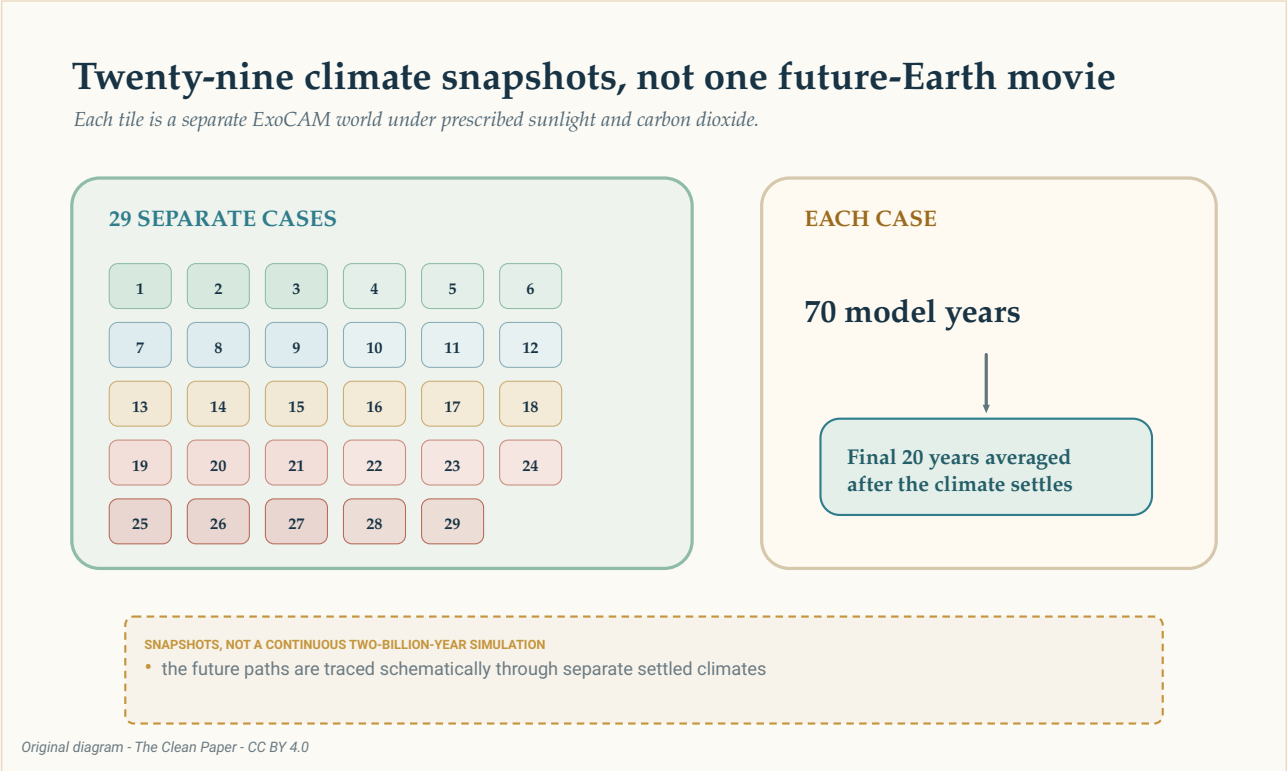
Esetazonosító	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143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

Esetazonosító	S/S0	CO2 (ppm)
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

A modell-Föld felismerhető, de szándékosan korlátozott. Föld méretű és mai földrajzot használ. Teljesen cirkuláló óceán helyett leegyszerűsített rétegóceánja van, légköri nyomása nagyjából a Föld mai értékére, egy barra van állítva, a metán pedig rögzített. Pályája tökéletesen kör alakú (zéró excentricitás), forgástengelyének nincs dőlése (zéró ferdeség). Nincs benne explicit talaj, növényzet vagy a változó bioszféra visszacsatolása. A legfontosabb, hogy a klímamodell nincs dinamikusan összekapcsolva kőzetmállási modellel. Más szóval az ExoCAM nem számolja ki a mállást, nem frissíti vele a szén-dioxidot, majd nem futtatja a következő klímát visszacsatolási hurokban. A kutatók ehelyett előírták a két szélső útvonalat, és végigvezették őket a 29 esetből álló klímarácson.

Mit jelent az „egyensúlyi állapot" egy klímamodellben?

Az egyensúlyi eset olyan modellklíma, amelyet egy kiválasztott Nap és légkör mellett hagynak beállni. Az időjárás a szimuláción belül továbbra is változik napról napra és évről évre, de hosszú távú átlagai már nem sodródnak erősen.
Ez hasznos annak megkérdezésére, hogy „milyen klíma illik ezekhez a feltételekhez?". Más kérdés, mint annak pontos előrejelzése, milyen útvonalon halad a valódi Föld egyik feltételkészlettől a következőig.



Minden csempe egy külön ExoCAM-klímafuttatás 70 modelléven át, az utolsó 20 év átlagával. A tanulmány 29 beállt klímát mintázott előírt napsugárzási és szén-dioxid-feltételek között; nem egyetlen, kétmilliárd éven át folyamatosan fejlődő Földet szimulált.

The Clean Paper CC BY 4.0

Első szélső eset: elég szén-dioxid, túl sok hő

A gyenge mállású ágban a szén-dioxid 400 ppm-en marad. Ahogy nő a napenergia-bevitel, a hő válik korlátozó tényezővé.

A tanulmány korábbi munkákból két globális átlaghőmérsékleti küszöböt használ:

- **323 kelvinnél**, vagyis globális éves átlagban körülbelül **50 Celsius-foknál** a világot a legtöbb szárazföldi növény számára túl forrónak tekintik. A modell ezt a küszöböt körülbelül **1,68 milliárd év** múlva éri el.
- **338 kelvinnél**, vagyis globális éves átlagban körülbelül **65 Celsius-foknál** a világot minden szárazföldi növény számára túl forrónak tekintik. A modell ezt a küszöböt körülbelül **1,87 milliárd év** múlva éri el.

Ezek átvett biológiai korlátok, nem univerzális hőmérsékletek, amelyeknél minden fotoszintetizáló szervezet szükségszerűen elbukik. A globális átlag nagy regionális különbségeket is elfed. A tanulmány külön vizsgálja, hol maradhatnak megfelelőek a hőmérséklet és víz kombinációi, de egy klímatérkép címkéje nem katalogizálhat minden jövőbeli menedéket vagy alkalmazkodást.

Második szélső eset: elviselhető hőmérséklet, túl kevés szén-dioxid

Az erős mállású ágban a globális átlaghőmérséklet 288 kelvin, körülbelül 15 Celsius-fok marad, miközben a légköri szén-dioxid csökken. Itt a válasz attól függ, milyen kevés szenet képesek használni a különböző fotoszintetikus útvonalak.

- A hagyományos **10 ppm-es** küszöbnél — egymillió légköri molekulára 10 szén-dioxid-molekula — a C4-fotoszintézis korlátja körülbelül **1,35 milliárd év** múlva érkezik el. C4-fotoszintézist többek között a kukorica és a cukornád használ, és ez az útvonal a szén-dioxidot a megkötését végző enzim körül koncentrálja.
- A korábbi munkákban tárgyalt alternatív **2,9 ppm-es** C4-küszöb körülbelül **1,64 milliárd évre** tolja ezt.
- Egy bizonytalan **1 ppm-es** küszöb, amelyet egyes CAM-növények — vagyis Crassulacean savanyagcserét használó, a szén-dioxid éjszakai felvételét nappali felhasználásától elválasztó növények — vagy oldott bikarbonátot használni képes vízinövények lehetséges fennmaradásával társítanak, körülbelül **1,84 milliárd évre** tolja a korlátot.

Az utolsó számhoz tartozik a legnagyobb biológiai fenntartás. A szerzők kifejezetten bizonytalannak nevezik az egy ppm-es határt. Ez nem kísérletileg megállapított túlélési küszöb minden CAM-növény vagy vízi növényzet számára a jövőbeli Föld körülményei között.

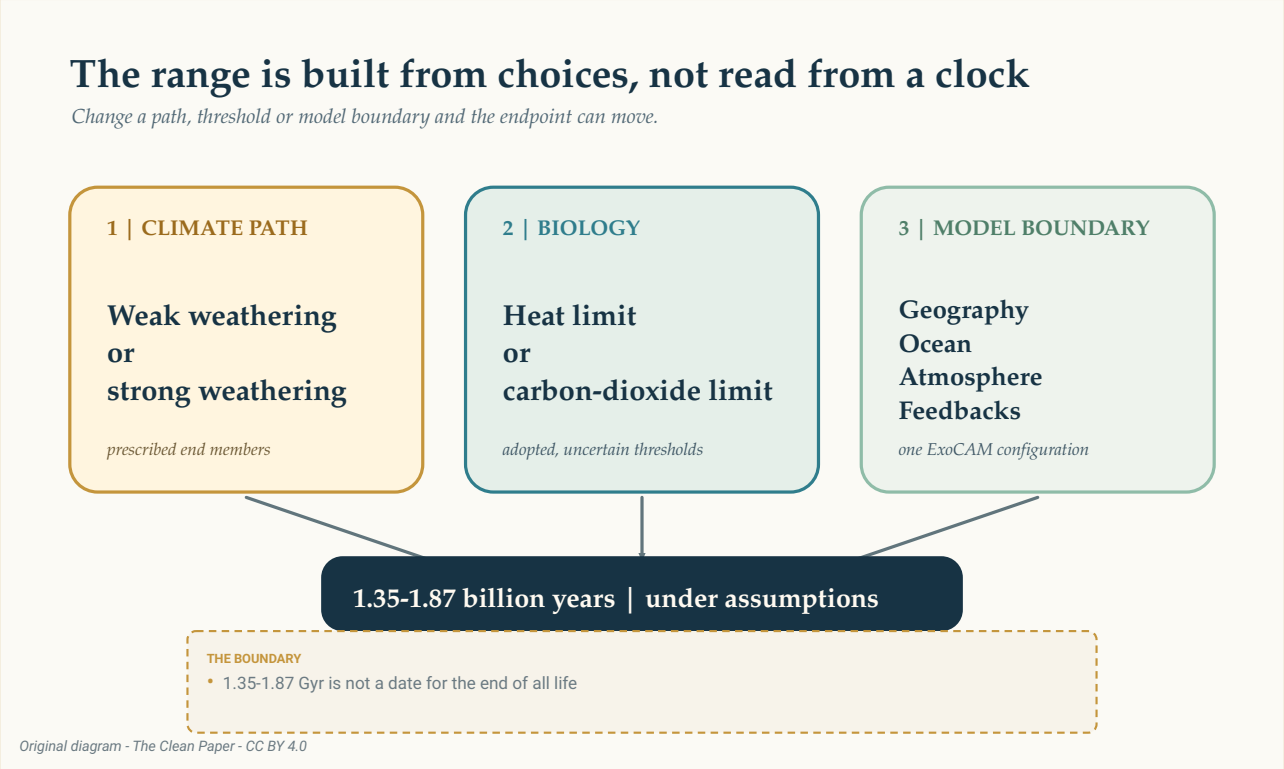
> **A C3, C4 és CAM stratégiák, nem létrafokok**
>
> A növények különböző biokémiai útvonalakat használnak a szén megkötésére. A **C3-fotoszintézis** a leggyakoribb. A többek között kukoricában és cukornádban használt **C4-fotoszintézis** a szén-dioxidot a szenet megkötő enzim körül koncentrálja, és szén-dioxid-hiányban jobban működhet. A **Crassulacean savanyagcsere (CAM)** a szén felvételét és felhasználását éjszaka és nappal szétválasztja, ami sok növénynek segít vizet megtakarítani. Ezek sok fajszintű eltérést tartalmazó stratégiacsaládok, nem egyre „jobb” növények egymást követő fokozatai. A tanulmány nagyon alacsony szén-dioxid-küszöbei a lehetséges korlátok feltárására szolgáló feltevések, nem garanciák arra, hogy egy jövőbeli ökoszisztéma úgy fejlődik, hogy ki tudja használni őket.

Miért nem lejárati dátum az 1,86 milliárd év?

A tanulmány címadó, körülbelül **1,86 milliárd éves** becslése a két optimista felső végpont átlaga: 1,84 milliárd év a szén-dioxid-korlátozott ágban és 1,87 milliárd év a hőkorlátozott ágban. Két eltérő forgatókönyv tömör összefoglalása. Nem egy harmadik, nagyobb pontosságú modelleredmény, és nem a legjobb becslésű dátum.

Még a tágabb 1,35–1,87 milliárd éves tartományhoz sem tartozik egyetlen valószínűség. Alsó és

felső értéke eltérő állási feltevésektől, eltérő biológiai küszöböktől és egyetlen klímamodell-konfigurációtól függ. A tartomány legalább annyira méri a kísérletben hozott döntéseket, mint az időt.



Az 1,35–1,87 milliárd éves tartomány csak egy állási út, egy biológiai küszöb és egy modellhatár kiválasztása után jelenik meg. Ez a feltevések térképe, nem egy óra, amely minden élet kihalásával ér véget.

The Clean Paper CC BY 4.0

Más korlátok előbb érkezhetnek

A vegetatív bioszféra leghosszabb becslései megközelítenek egy különálló és bizonytalan határt: a nedves vagy elszabaduló üvegházhatást, amely jelentős óceánvesztést indíthat el. A klímamodellek jelentősen eltérnek abban, mikor kezdődnek ezek az állapotok növekvő napsugárzás mellett, különösen a mai körülményektől távol. Egyes becslések az optimista fotoszintézis-korlát elé helyezik őket.

Ez azt jelenti, hogy a felső ágat nem lehet ígéretként olvasni arra, hogy a Föld még 1,87 milliárd évig megtartja óceánjait, ismerős kontinenseit vagy lakható felszíni körülményeit. A modell nem tartalmazza a jövőbeli lemeztektonikát, a szárazföldterület változásait, a fejlődő ökoszisztémákat vagy teljesen dinamikus óceánt sem. A légkör energiaelnyelésére és -kibocsátására vonatkozó számításokat ráadásul olyan erős napsugárzási és rendkívül alacsony szén-dioxid-tartományokba tolják, ahol a különböző modellek eltérnek egymástól.

Az evolúciós alkalmazkodás és a technológiai beavatkozás lehetőségként jelenik meg a tanulmány

tárgyalásában. Nem a 29 klímaszimuláció eredményei. A modell nem mutatja, hogy a jövő élőlényei egy ppm-es fotoszintetikus útvonalat fejlesztenek ki, és azt sem, hogy egy civilizáció egymilliárd éven át kezeli a légkört.

Ez nem a mai klímaválságról szóló eredmény

A Nap fényesedése több százmillió–több milliárd éves időskálán hat. A mai ember okozta felmelegedés a gyorsan növekvő üvegházhatású gázokból ered évtizedes és évszázados időskálán. Ezek különböző kényszerek, radikálisan különböző időtávokon, és különböző kérdésekre válaszolnak.

Ebben a tanulmányban semmi sem gyengíti a jelenlegi klímaváltozás bizonyítékait, és semmi sem érv a cselekvés halogatása mellett. Egy bioszféra, amely egy távoli modellforgatókönyvben esetleg megtart valamennyi fotoszintetikus életet, nem ugyanaz, mint egy klíma, amelyben a mai társadalmak és ökoszisztémák biztonságban maradnak.

A tanulmány értéke abban áll, hogy fegyelmezettebbé tesz egy távoli kérdést. Megmutatja, hogy a korábbi, egyszerűbb modellek talán túlságosan felmelegedtek, amikor a napsugárzás növekedett, miközben a szén-dioxid rögzítve maradt, és hogy a fotoszintetikus életnek több fennmaradási útja lehet, mint amit egyetlen kanonikus szénküszöb sugall. Azt is megmutatja, miért kapcsolódik minden további milliárdévtöredékhez egy feltételezési lánc.

A levelet tápláló Nap lassan változik. Hogy a Föld további 1,35, 1,87 vagy más számú milliárd évig marad-e zöld, attól függ, hogyan reagálnak együtt a kőzetek, a víz, a légkör és az élet. A becsületes eredmény nem egy dátum. Hanem ennek a kompromisszumnak a tágabb képe.

Röviden

Egy háromdimenziós klímatanulmány azt kérdezi, meddig maradhat fenn a Föld vegetatív — fotoszintetikus — bioszférája, miközben a Nap lassan fényesedik. A kutatók 29 különálló egyensúlyi klímát számoltak ki, és két szemléltető szélső esetet vezettek végig rajtuk. Gyenge mállással és 400 ppm-en rögzített szén-dioxiddal a szárazföldi növényekre alkalmazott hőhatárok körülbelül 1,68 és 1,87 milliárd év múlva jelennek meg. Erős mállással, valamint 288 kelvinen, vagyis körülbelül 15 Celsius-fokon rögzített globális átlaghőmérséklettel a fotoszintézisre alkalmazott szén-dioxid-határok körülbelül 1,35, 1,64 és — egy bizonytalan küszöb használatával — 1,84 milliárd év múlva érkeznek el. A gyakran idézett 1,86 milliárd év csupán a két optimista felső végpont kerekített átlaga. Ezek forgatókönyvfüggő modelltartományok, nem dátumok arra, mikor ér véget a Föld, az emberiség vagy minden élet. A modell előírt útvonalakat, mai földrajzot, rétegóceánt használ, és nincs benne explicit talaj–növényzet vagy klíma–mállás összekapcsolás; a leghosszabb becslések pedig bizonytalan üvegház- és óceánvesztési határokat közelítenek meg.

Tárgyilagos mérleg

Mit mutat a tanulmány: Ebben az ExoCAM-konfigurációban a háromdimenziós klímák növekvő napsugárzás és rögzített szén-dioxid mellett általában kevésbé melegszenek, mint az összehasonlításra használt egyszerűsített modellek. Két előírt mállási szélső eset és több alkalmazott biológiai küszöb mellett a vegetatív bioszféra korlátai nagyjából 1,35–1,87 milliárd év múlva jelennek meg.

Mi hihető, de nem bizonyított: Hogy egyes CAM-növények vagy oldott bikarbonátot használó vízinövények körülbelül egy ppm légköri szén-dioxid mellett is fenntarthatják a fotoszintézist; hogy az alkalmazkodás vagy technológia tovább hosszabbíthatja a fotoszintetikus életet; és hogy a valódi klíma–mállás útvonal a két modell-szélső eset között marad.

Mit nem mutat: Rögzített dátumot minden növény, minden élet, az emberi civilizáció, a Föld óceánjai vagy a bolygó végére; a következő kétmilliárd év egyetlen folyamatos szimulációját; vagy bármilyen okot a mai ember okozta klímaváltozás lebecsülésére.

Fő korlátok: Huszonkilenc egyensúlyi eset egyetlen klímamodell-családból; előírt, nem dinamikusan összekapcsolt mállási pályák; mai földrajz; rétegóceán; rögzített metán; nulla tengelyferdeség és excentricitás; explicit talaj, növényzet vagy bioszféra-visszacsatolás hiánya; bizonytalan hő- és szén-dioxid-küszöbök; valamint nagy modellkülönbségek a nedves és elszabaduló üvegházhatás környezetében.

Mennyi bizalma legyen egy általános olvasónak? Nagy bizalommal mondható, hogy a tanulmány kiszélesíti a hihető modelltartományt, és azonosítja az azt szabályozó feltevéseket. Közepes bizalom indokolt a számszerű tartományban mint e modellen belüli hasznos keretben. Alacsony bizalom indokolt bármely pontos dátumban, mert a legtávolabbi végpontok szándékosan szélsőséges klímapályáktól és bizonytalan biológiától függenek.

Források

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