The Clean Paper

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

Колку долго Земјата може да остане зелена? Климатски модел нуди опсези, а не датум за судниот ден

Дваесет и девет тридимензионални климатски симулации поставуваат различни граници за фотосинтетската биосфера на Земјата меѓу приближно 1,35 и 1,87 милијарди години од сега. Вредностите зависат од намерно поедноставени патеки за изветрување на карпите, топлина и најниските нивоа на јаглерод диоксид што растенијата можеби би можеле да ги користат. Тие не предвидуваат кога ќе завршат сите растенија, целиот живот, цивилизацијата или планетата.

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

Колку долго Земјата може да остане зелена? Климатски модел нуди опсези, а не датум за судниот ден

Еден лист живее во рамките на тесен компромис. Му се потребни светлина, вода, јаглерод диоксид и температура што неговата хемија може да ја поднесе. Во текот на еден човечки живот, Сонцето изгледа како фиксниот дел од тој компромис. Во текот на милијарда години, тоа не е така.

Како што Сонцето старее на главната низа, полека станува посјајно. Повеќе сончева светлина ја загрева Земјата, но планетата има долгорочен одговор: реакциите меѓу дождовницата, јаглерод диоксидот и силикатните карпи можат да отстрануваат јаглерод диоксид од атмосферата. Тоа го ослабува ефектот на стаклена градина и надоместува дел од затоплувањето. Истиот одговор што ја лади планетата на крајот може да ги лиши фотосинтетските организми од јаглеродот што го користат за изградба на живо ткиво.

Нов труд во Journal of Geophysical Research: Atmospheres прашува која граница би можела да настапи прва: премногу топлина или премалку јаглерод диоксид. Одговорот не е датум кога Земјата умира. Низ две намерно поедноставени идни патеки, усвоените граници за фотосинтетскиот живот се наоѓаат приближно **меѓу 1,35 и 1,87 милијарди години од сега**.

Тој опсег се однесува на **вегетативната биосфера**: делот од живиот систем на Земјата што го одржуваат фотосинтетските организми, особено растенијата и другите форми на живот што ги претвораат светлината и јаглерод диоксидот во биолошки материјал. Тоа не е прогноза за секој микроб. Не е животниот век на човечката цивилизација. Не е животниот век на планетата.

Планетарниот термостат има две неизвесни поставки

Главната неизвесност е **силикатното изветрување**. Јаглерод диоксидот се раствора во дождовницата, реагира со силикатните карпи и на крајот се пренесува кон океаните и седиментите. Вулканите го враќаат јаглерод диоксидот во текот на геолошкото време. Заедно, овие процеси се дел од карбонатно-силикатниот циклус, кој често се опишува како планетарен термостат.

Во потопол и повлажен свет, изветрувањето може да се забрза и побрзо да го отстранува јаглерод диоксидот. Но научниците не знаат колку силно тој одговор ќе ја контролира Земјата под идно, посјајно Сонце. Затоа Џејкоб Хак-Мисра и Ерик Волф не избраа една наводно точна патека. Тие моделираа две **крајни состојби**: намерно екстремни случаи што служат за ограничување на неизвесноста.

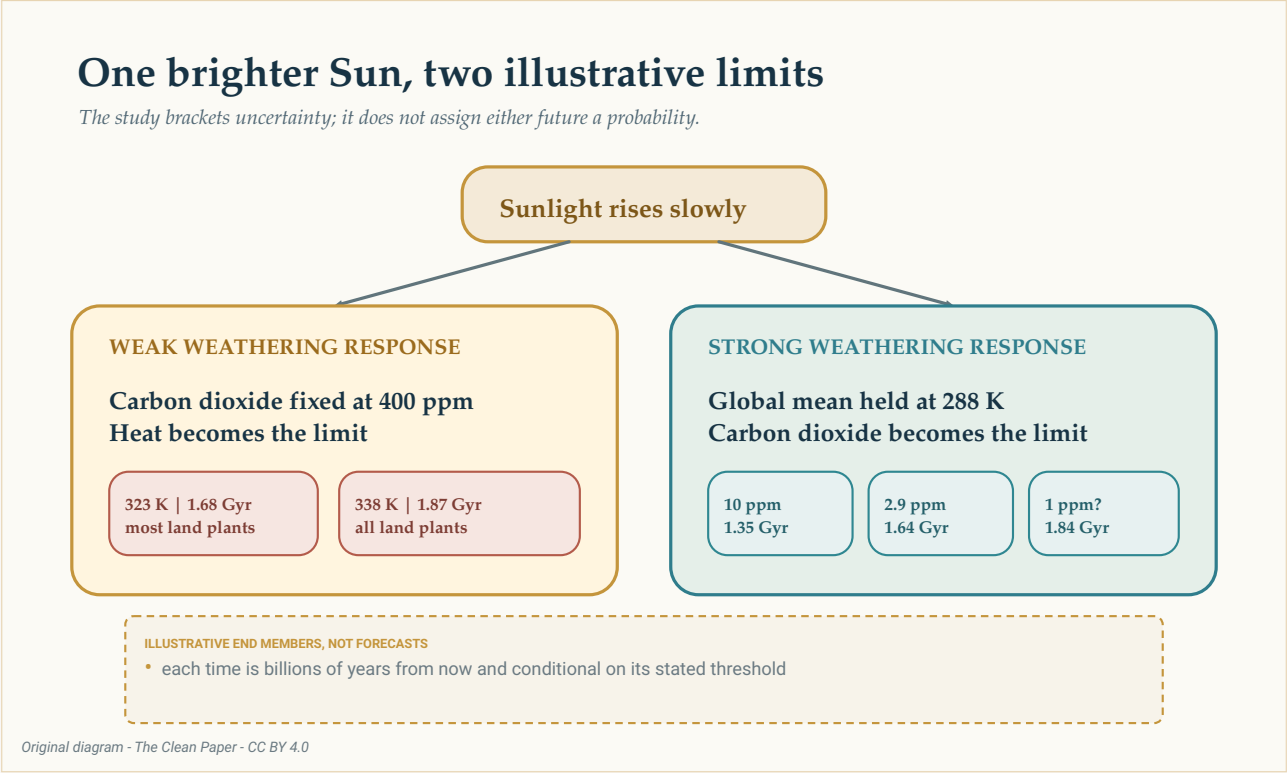
- Во **крајната состојба со слабо изветрување**, атмосферскиот јаглерод диоксид

останува на 400 делови на милион, додека посјајното Сонце ја зголемува температурата.
- Во **крајната состојба со силно изветрување**, глобалната средна температура на површината останува на 288 келвини, околу 15 степени Целзиусови, додека јаглерод диоксидот се намалува со зголемувањето на сончевото зрачење.

Ниту една гранка не е претставена како вистинската иднина на Земјата. Првата прашува што би направила топлината ако јаглерод диоксидот остане висок. Втората прашува што би направило гладувањето за јаглерод ако изветрувањето ја одржува глобалната температура близу денешниот просек.

Како изветрувањето може да дејствува како термостат?

Аналогијата се однесува на повратна врска, а не на буквално контролно копче. Кога потоплата клима го забрзува хемиското изветрување, повеќе атмосферски јаглерод диоксид може да заврши во растворен материјал, минерали и седименти. Отстранувањето на тој стакленички гас се спротивставува на дел од првичното затоплување. На многу долги временски скали, вулканското испуштање повторно го враќа јаглерод диоксидот.
Јачината на секоја алка зависи од врнежите, изложените карпи, ерозијата, биологијата, тектониката и хемијата на океаните. Затоа трудот тестира гранични одговори наместо да го третира термостатот како позната машина.



Трудот ја ограничува неизвесната иднина со две илустративни крајни состојби. Ако изветрувањето реагира слабо, растечката топлина ги достигнува усвоените прагови за копнените растенија. Ако реагира

силно, опаѓачкиот јаглерод диоксид ги достигнува усвоените прагови за фотосинтеза. Ова се условни гранки на моделот, а не веројатности или датуми на одбројување.

The Clean Paper CC BY 4.0

Дваесет и девет стабилизирани моделски светови, а не еден филм од две милијарди години

Истражувачите го користеа ExoCAM, тридимензионален глобален климатски модел, за да пресметаат **29 клими во стационарна состојба** низ комбинации на посилна сончева светлина и понизок јаглерод диоксид. Секој случај беше пуштен 70 моделски години. Тука, една моделска година е еден симулиран годишен циклус под фиксни услови: тоа е време на извршување што се користи за вештачката клима да се стабилизира, а не еден чекор во година-по-година прогноза за иднината на Земјата. Последните 20 години беа просечени откако симулираната клима имаше време да се стабилизира.

Тие 29 случаи се одделни моделски светови. Секое извршување е една точка во мрежа, што одговара на прашањето „која стабилизирана клима одговара на оваа избрана комбинација од сончева светлина и јаглерод диоксид?“ Компјутерот не почнал со денешната Земја и потоа непрекинато да ги развива нејзината атмосфера, карпи, океани и живи организми во следните две милијарди години. Наместо тоа, авторите ги следеа двете шематски патеки на изветрување низ тие однапред пресметани точки; самата патека меѓу точките не беше симулирана.

Табелата ги репродуцира комбинациите на сончева светлина и јаглерод диоксид во официјалната архива со моделски податоци. ID-ознаките на случаите се помош за читање додадена овде според редоследот во архивата. **S/S0** е релативната соларна константа: влезната сончева енергија користена во моделот поделена со нејзината денешна вредност, S0. Вредност 1,2 затоа значи 20 проценти повеќе влезна сончева енергија отколку денес. **CO2 (ppm)** е атмосферскиот однос на мешање на јаглерод диоксид во молекули на милион атмосферски молекули.

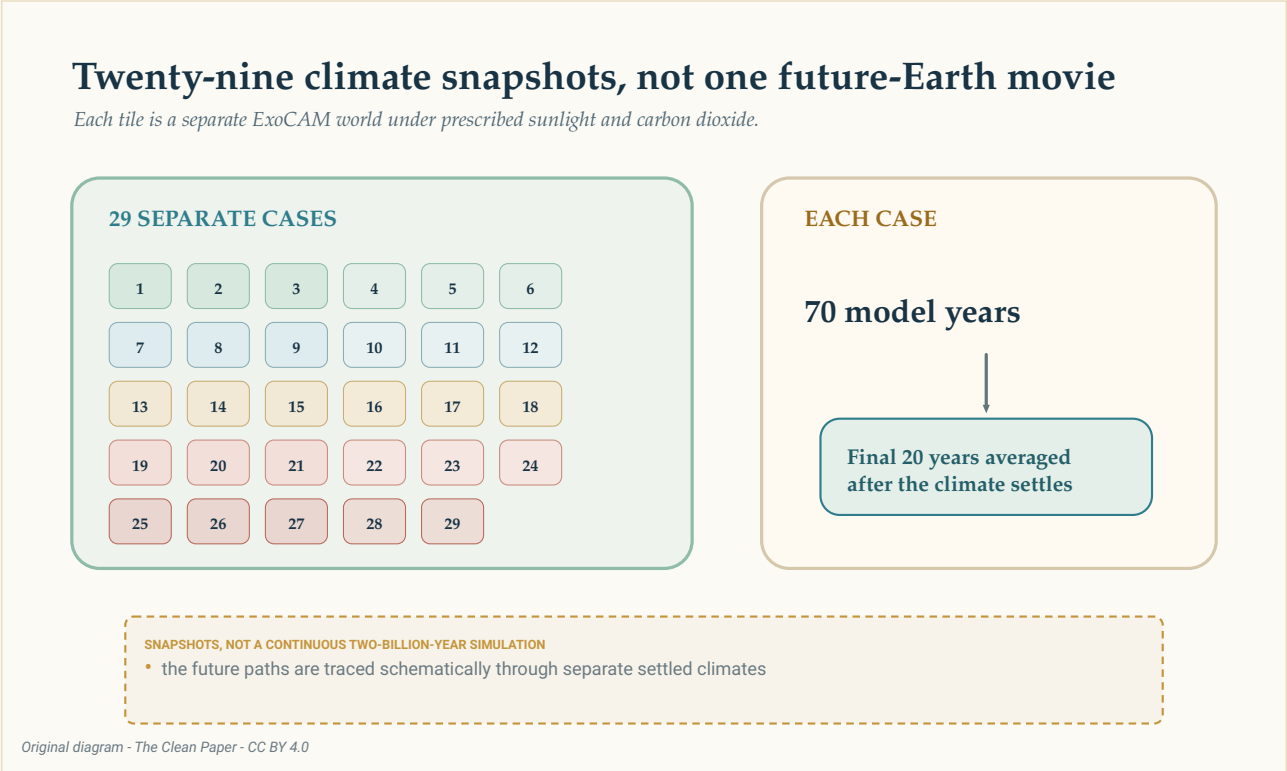
ID на случај	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625

ID на случај	S/S0	CO2 (ppm)
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

Моделската Земја е препознатлива, но намерно ограничена. Таа е со големина на Земјата и ја користи денешната географија. Има поедноставен плочест океан наместо океан со целосна циркулација, атмосферски притисок поставен приближно на денешната вредност на Земјата (еден бар) и фиксен метан. Нејзината орбита е совршено кружна (нулта ексцентричност), а оската на ротација нема наклон (нулта обликуитет). Нема експлицитни почви, вегетација или повратна врска од променлива биосфера. Најважно, климатскиот модел не е динамички спрегнат со модел на изветрување на карпите. Со други зборови, ExoCAM не го пресметува изветрувањето, не го користи за да го ажурира јаглерод диоксидот и потоа не ја пушта следната клима во повратна јамка. Наместо тоа, истражувачите ги зададоа двете гранични патеки и ги следеа низ климатската мрежа од 29 случаи.

Што значи „стационарна состојба“ во климатски модел?

Случај во стационарна состојба е моделска клима на која ѝ е дозволено да се стабилизира под едно избрано Сонце и една атмосфера. Времето и понатаму се менува од ден на ден и од година на година во симулацијата, но неговите долгорочни просеци престануваат силно да се поместуваат.
Ова е корисно за прашањето „која клима одговара на овие услови?“ Тоа е различно од предвидување на точната патека по која вистинската Земја преминува од еден сет услови во друг.



Секоја плочка е одделно климатско извршување на ExoCAM во траење од 70 моделски години, при што последните 20 години се просечени. Студијата зема примерок од 29 стабилизирани клими низ зададени услови на сончева светлина и јаглерод диоксид; не симулира една Земја што непрекинато се развива две милијарди години.

The Clean Paper CC BY 4.0

Крајна состојба еден: доволно јаглерод диоксид, премногу топлина

Во гранката со слабо изветрување, јаглерод диоксидот останува фиксиран на 400 делови на милион. Како што расте сончевиот прилив, топлината станува ограничувачкиот фактор.

Трудот користи два прага на глобална средна температура преземени од претходни истражувања:

- При **323 келвини**, околу **50 степени Целзиусови** како глобален годишен просек, светот се третира како премногу жежок за повеќето копнени растенија. Моделот го достигнува тој праг за околу **1,68 милијарди години**.
- При **338 келвини**, околу **65 степени Целзиусови** како глобален годишен просек, светот се третира како премногу жежок за сите копнени растенија. Моделот го достигнува тој праг за околу **1,87 милијарди години**.

Ова се усвоени биолошки граници, а не универзални температури на кои нужно откажува секој фотосинтетски организам. Глобалниот просек исто така прикрива големи регионални разлики. Студијата одделно испитува каде комбинациите на температура и вода би можеле да останат погодни, но ознака на климатска карта не може да го каталогизира секое идно прибежиште или адаптација.

Крајна состојба два: поднослива температура, премалку јаглерод диоксид

Во гранката со силно изветрување, глобалната средна температура се одржува на 288 келвини, околу 15 степени Целзиусови, додека атмосферскиот јаглерод диоксид опаѓа. Тука одговорот зависи од тоа колку малку јаглерод можат да користат различните фотосинтетски патишта.

- При традиционалниот праг од **10 делови на милион** — 10 молекули јаглерод диоксид на секој милион атмосферски молекули — границата за C4-фотосинтеза настапува за околу **1,35 милијарди години**. C4-фотосинтезата ја користат растенија меѓу кои пченката и шеќерната трска и таа го концентрира јаглерод диоксидот околу ензимот што го фиксира.
- Користењето алтернативен C4-праг од **2,9 делови на милион**, разгледуван во претходни истражувања, го поместува тоа на околу **1,64 милијарди години**.
- Привремен праг од **1 дел на милион**, поврзан со можното опстојување на некои CAM-растенија — растенија што користат красулацеански киселински метаболизам, кој го одделува внесувањето јаглерод диоксид ноќе од неговата употреба дење — или водни растенија способни да користат растворен бикарбонат, го поместува тоа на околу **1,84 милијарди години**.

Последната бројка носи најголема биолошка ограда. Авторите експлицитно ја нарекуваат границата од еден дел на милион привремена. Таа не е експериментално утврден праг за преживување на сите CAM-растенија или водна вегетација во услови на идната Земја.

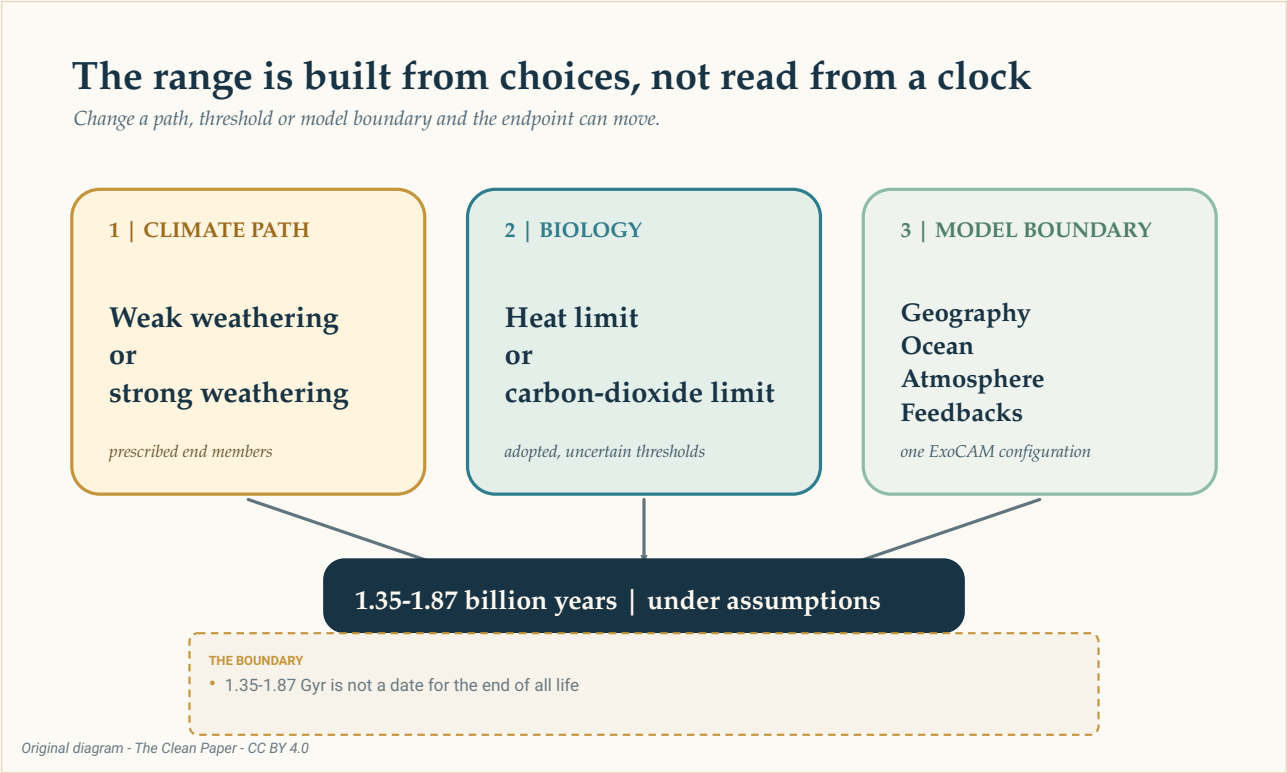
> **C3, C4 и CAM се стратегии, а не скала**
>
> Растенијата користат различни биохемиски патишта за фаќање јаглерод. **C3-фотосинтезата** е најчеста. **C4-фотосинтезата**, што ја користат растенија меѓу кои пченката и шеќерната трска, го концентрира јаглерод диоксидот околу ензимот што го фиксира јаглеродот и може да работи подобро кога јаглерод диоксидот е оскуден. **Красулацеанскиот киселински метаболизам (CAM)** го одделува внесувањето и употребата на јаглеродот меѓу ноќта и денот, помагајќи им на многу растенија да штедат вода.

> Ова се семејства на стратегии со многу разлики меѓу видовите, а не последователни рангови на „подобри“ растенија. Многу ниските прагови на јаглерод диоксид во трудот се претпоставки за истражување на можните граници, а не гаранции дека некој иден екосистем ќе еволуира за да ги користи.

Зошто 1,86 милијарди години не е датум на истекување

Главната процена на трудот од околу **1,86 милијарди години** е просек од двете оптимистички горни крајни точки: 1,84 милијарди години во гранката ограничена од јаглерод диоксид и 1,87 милијарди години во гранката ограничена од топлина. Тоа е компактно резиме на две различни сценарија. Не е трет резултат на моделот со поголема прецизност и не е датум со најдобра процена.

Дури и поширокиот распон од 1,35 до 1,87 милијарди години нема една единствена веројатност. Неговите долни и горни вредности зависат од различни претпоставки за изветрувањето, различни биолошки прагови и една конфигурација на климатски модел. Опсегот ги мери изборите во експериментот исто толку колку што го мери времето.



Опсегот од 1,35 до 1,87 милијарди години се појавува само откако ќе се изберат патека на изветрување, биолошки праг и граница на моделот. Тоа е карта на претпоставки, а не часовник што завршува со исчезнување на целиот живот.

The Clean Paper CC BY 4.0

Други граници можат да настапат порано

Најдолгите процени за вегетативната биосфера се приближуваат до посебна и неизвесна граница: влажен или неконтролиран ефект на стаклена градина што би можел да предизвика голема загуба на океанска вода. Климатските модели значително не се согласуваат околу тоа кога тие состојби почнуваат при растечко сончево зрачење, особено далеку од денешните услови. Некои процени ги поставуваат пред најоптимистичката граница за фотосинтеза.

Тоа значи дека горната гранка не може да се чита како ветување дека Земјата ќе ги задржи своите океани, познатите континенти или населивите површински услови до 1,87 милијарди години од сега. Моделот исто така не ги вклучува идната тектоника на плочи, промените во површината на копното, екосистемите што еволуираат или целосно динамичен океан. Неговите пресметки за тоа како атмосферата апсорбира и емитува енергија се туркаат и во режими на интензивна сончева светлина и екстремно низок јаглерод диоксид, каде различните модели се разидуваат.

Еволутивната адаптација и технолошката интервенција се појавуваат во дискусијата на трудот како можности. Тие не се излези од 29-те климатски симулации. Моделот не покажува дека идни организми еволуираат фотосинтетски пат со еден дел на милион, ниту покажува цивилизација што управува со атмосферата една милијарда години.

Ова не е резултат за денешната климатска криза

Сончевото засилување дејствува во текот на стотици милиони до милијарди години. Современото затоплување предизвикано од луѓето доаѓа од брзо зголемување на стакленичките гасови во текот на децении и векови. Тоа се различни принудувања, на радикално различни временски скали, што одговараат на различни прашања.

Ништо во оваа студија не ги ослабува доказите за сегашните климатски промени ниту претставува аргумент за одложување на дејствувањето. Биосфера што можеби задржува некаков фотосинтетски живот во едно далечно моделско сценарио не е исто што и клима во која денешните општества и екосистеми остануваат безбедни.

Трудот е вреден затоа што едно далечно прашање го прави подисциплинирано. Покажува дека поранешните, поедноставни модели можеби се загревале премногу кога сончевото зрачење се зголемувало додека јаглерод диоксидот останувал фиксен, и дека фотосинтетскиот живот можеби има повеќе патишта за опстојување отколку што сугерира еден канонски праг на јаглерод. Тој исто така покажува зошто секоја дополнителна децимала од милијарда години доаѓа прикачена на синџир претпоставки.

Сонцето што го храни листот полека се менува. Дали Земјата ќе остане зелена уште 1,35, 1,87 или некој друг број милијарди години ќе зависи од карпите, водата, атмосферата и животот што реагираат заедно. Чесниот резултат не е датум. Тоа е поширок поглед на компромисот.

Кратко резиме

Тридимензионална климатска студија прашува колку долго би можела да опстои вегетативната — фотосинтетска — биосфера на Земјата додека Сонцето полека станува посјајно. Истражувачите пресметаа 29 одделни клими во стационарна состојба и низ нив следеа две илустративни крајни состојби. Со слабо изветрување и јаглерод диоксид фиксиран на 400 делови на милион, усвоените топлински граници за копнените растенија настапуваат за околу 1,68 и 1,87 милијарди години од сега. Со силно изветрување и глобална средна температура фиксирана на 288 келвини, околу 15 степени Целзиусови, усвоените граници на јаглерод диоксид за фотосинтеза настапуваат за околу 1,35, 1,64 и, со употреба на привремен праг, 1,84 милијарди години. Често цитираниот број од 1,86 милијарди години е само заокруженото просек на двете оптимистички горни крајни точки. Ова се опсези на модел зависни од сценариото, а не датум кога ќе завршат Земјата, човештвото или целиот живот. Моделот користи зададени патеки, денешна географија, плочест океан и нема експлицитно спрегнување почва–вегетација или клима–изветрување, а најдолгите процени се приближуваат до неизвесни граници на стаклена градина и загуба на океаните.

Проверка без претерување

Што покажува трудот: Во оваа конфигурација на ExoCAM, тридимензионалните клими генерално се загреваат помалку при растечко сончево зрачење и фиксен јаглерод диоксид отколку поедноставените модели користени за споредба. Низ две зададени крајни состојби на изветрување и неколку усвоени биолошки прагови, границите за вегетативната биосфера се наоѓаат приближно меѓу 1,35 и 1,87 милијарди години од сега.

Што е веродостојно, но не е утврдено: Дека некои CAM-растенија или водни растенија што користат растворен бикарбонат би можеле да одржуваат фотосинтеза близу еден дел на милион атмосферски јаглерод диоксид; дека адаптацијата или технологијата би можеле дополнително да го продолжат фотосинтетскиот живот; и дека вистинската патека клима–изветрување ќе остане меѓу двете крајни состојби на моделот.

Што не покажува: Фиксен датум за крајот на сите растенија, целиот живот, човечката цивилизација, океаните на Земјата или планетата; една непрекината симулација на

следните две милијарди години; ниту каква било причина да се потцени сегашната климатска промена предизвикана од луѓето.

Главни ограничувања: Дваесет и девет случаи во стационарна состојба од едно семејство климатски модели; зададени наместо динамички спрегнати патеки на изветрување; денешна географија; плочест океан; фиксен метан; нулта обликуитет и ексцентричност; без експлицитни почви, вегетација или повратна врска на биосферата; неизвесни прагови на топлина и јаглерод диоксид; и големо несогласување меѓу моделите во близина на услови за влажен и неконтролиран ефект на стаклена градина.

Колкава доверба треба да има општ читател? Висока доверба дека студијата го проширува веродостојниот моделски опсег и ги идентификува претпоставките што го контролираат. Умерена доверба во нумеричкиот распон како корисна заграда во рамките на овој модел. Ниска доверба во кој било точен датум, бидејќи најдалечните крајни точки зависат од намерно екстремни климатски патеки и неизвесна биологија.

Извори

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