The Clean Paper

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

Колко дълго Земята може да остане зелена? Климатичен модел предлага диапазони, не дата на края на света

Двадесет и девет триизмерни климатични симулации поставят различни граници за фотосинтетичната биосфера на Земята приблизително между 1,35 и 1,87 милиарда години от днес. Стойностите зависят от съзнателно опростени пътища за изветряне на скалите, топлината и най-ниските нива на въглероден диоксид, които растенията биха могли да използват. Те не предсказват кога ще изчезнат всички растения, целият живот, цивилизацията 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

Колко дълго Земята може да остане зелена? Климатичен модел предлага диапазони, не дата на края на света

Един лист съществува в рамките на тесен компромис. Нужни са му светлина, вода, въглероден диоксид и температура, която химията му може да понесе. В рамките на човешкия живот Слънцето изглежда като неизменната част от този компромис. В рамките на милиард години не е така.

Докато Слънцето старее на главната последователност, то постепенно става по-ярко. Повече слънчева светлина затопля Земята, но планетата има дългосрочен отговор: реакции между дъждовната вода, въглеродния диоксид и силикатните скали могат да отстраняват въглероден диоксид от атмосферата. Това отслабва парниковия ефект и компенсира част от затоплянето. Същият отговор, който охлажда планетата, в крайна сметка може да лиши фотосинтезиращите организми от въглерода, с който изграждат жива тъкан.

Нова статия в Journal of Geophysical Research: Atmospheres пита коя граница може да бъде достигната първа: прекалено много топлина или прекалено малко въглероден диоксид. Отговорът ѝ не е дата, на която Земята умира. При два съзнателно опростени бъдещи пътя приетите граници за фотосинтетичния живот се намират приблизително между **1,35 и 1,87 милиарда години от днес**.

Този диапазон се отнася до **растителната биосфера**: онази част от живата система на Земята, която се поддържа от фотосинтезиращи организми, особено растения и друг живот, превръщащ светлината и въглеродния диоксид в биологичен материал. Това не е прогноза за всеки микроб. Не е продължителността на човешката цивилизация. Не е продължителността на живота на планетата.

Планетарният термостат има две несигурни настройки

Основната неопределеност е **силикатното изветряне**. Въглеродният диоксид се разтваря в дъждовната вода, реагира със силикатни скали и в крайна сметка се пренася към океаните и седиментите. Вулканите връщат въглероден диоксид в течение на геоложкото време. Заедно тези процеси образуват част от карбонатно-силикатния цикъл, често описван като планетарен термостат.

В по-топъл и влажен свят изветрянето може да се ускори и да отстранява въглеродния диоксид по-бързо. Но учените не знаят колко силно този отговор ще управлява Земята под по-ярко бъдещо Слънце. Затова Джейкъб Хак-Мисра и Ерик Улф не избират един уж правилен път. Те моделират два **крайни случая**: съзнателно екстремни сценарии, използвани за ограничаване на неопределеността.

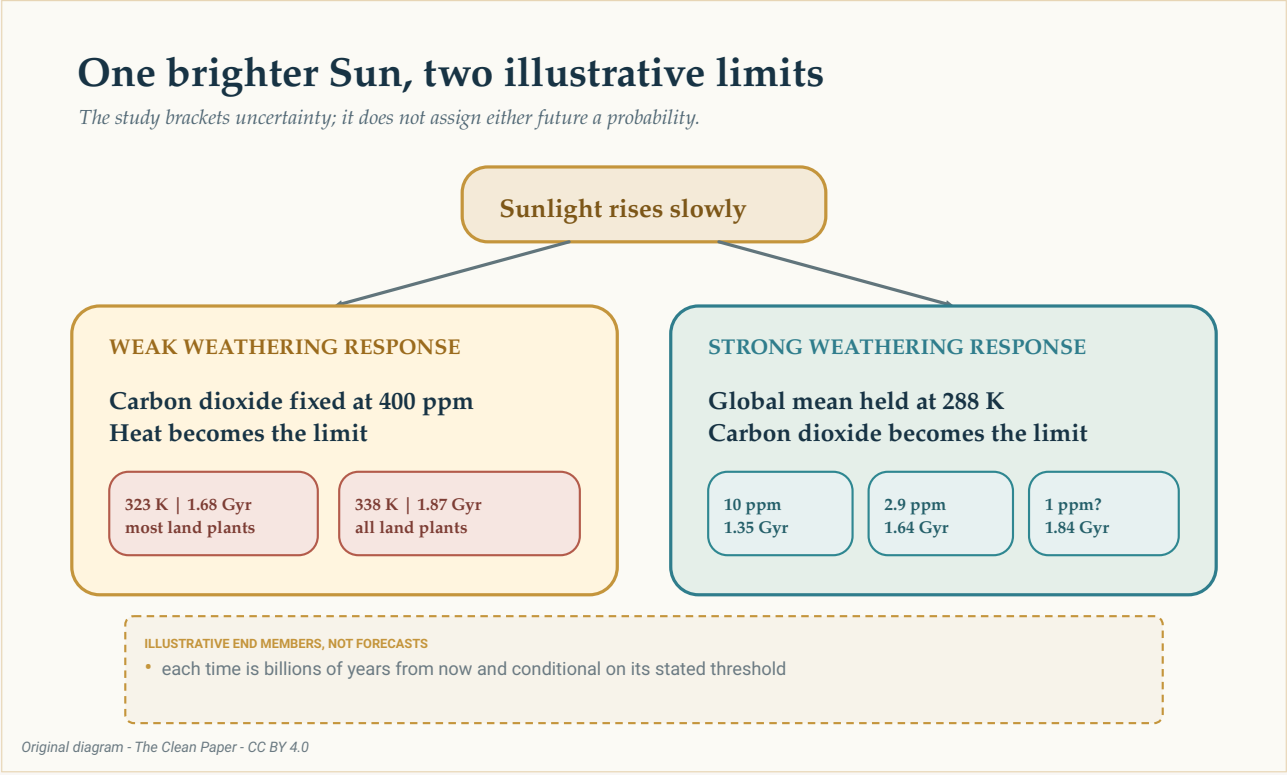
- При **крайния случай със слабо изветряне** атмосферният въглероден диоксид

остава 400 части на милион, докато по-яркото Слънце повишава температурата.
- При **крайния случай със силно изветряне** глобалната средна температура на повърхността остава 288 келвина, около 15 градуса по Целзий, докато въглеродният диоксид намалява с нарастването на слънчевата светлина.

Нито един от двата клона не е представен като действителното бъдеще на Земята. Първият пита какво би направила топлината, ако въглеродният диоксид остане висок. Вторият пита какво би направил недостигът на въглерод, ако изветрянето задържа глобалната температура близо до днешната средна стойност.

Как изветрянето може да действа като термостат?

Аналогията се отнася до обратна връзка, не до буквален регулатор. Когато по-топлият климат ускорява химичното изветряне, повече атмосферен въглероден диоксид може да попадне в разтворени вещества, минерали и седименти. Отстраняването на този парников газ противодейства на част от първоначалното затопляне. На много дълги времеви мащаби вулканичното отделяне връща въглеродния диоксид.
Силата на всяка връзка зависи от валежите, откритите скали, ерозията, биологията, тектониката и химията на океана. Затова статията изпитва гранични реакции, вместо да третира термостата като позната машина.



Статията огражда несигурното бъдеще с два илюстративни крайни случая. Ако изветрянето реагира слабо, нарастващата топлина достига приетите прагове за сухоземните растения. Ако реагира силно,

намаляващият въглероден диоксид достига приетите прагове за фотосинтезата. Това са условни клонове на модел, а не вероятности или дати на обратно броене.

The Clean Paper CC BY 4.0

Двадесет и девет установени моделни свята, не един двумилиарден филм

Изследователите използват ExoCAM, триизмерен глобален климатичен модел, за да изчислят **29 климата в стационарно състояние** при различни комбинации от по-силна слънчева светлина и по-нисък въглероден диоксид. Всеки случай е изпълняван в продължение на 70 моделни години. Тук една моделна година е един симулиран годишен цикъл при фиксирани условия: това е време за изчисление, използвано, за да се позволи на изкуствения климат да се установи, а не една стъпка в прогноза година по година за бъдещето на Земята. След като симулираният климат получава време да се установи, последните 20 години са осреднени.

Тези 29 случая са отделни моделни светове. Всяко изпълнение е една точка в решетка, която отговаря на въпроса: „Какъв установен климат съответства на тази избрана двойка от слънчева светлина и въглероден диоксид?“ Компютърът не започва с днешната Земя и не развива непрекъснато атмосферата, скалите, океаните и живите организми през следващите два милиарда години. Вместо това авторите проследяват двата схематични пътя на изветряне през предварително изчислените точки; самият път между точките не е симулиран.

Таблицата възпроизвежда комбинациите от слънчева светлина и въглероден диоксид в официалния архив с моделни данни. Идентификаторите на случаите са добавени тук като помощ при четенето, в реда на архива. **S/S0** е относителната слънчева константа: използваната в модела постъпваща слънчева енергия, разделена на днешната ѝ стойност S0. Следователно стойност 1,2 означава 20% повече постъпваща слънчева енергия от днес. **CO2 (ppm)** е отношението на смесване на атмосферния въглероден диоксид в молекули на милион атмосферни молекули.

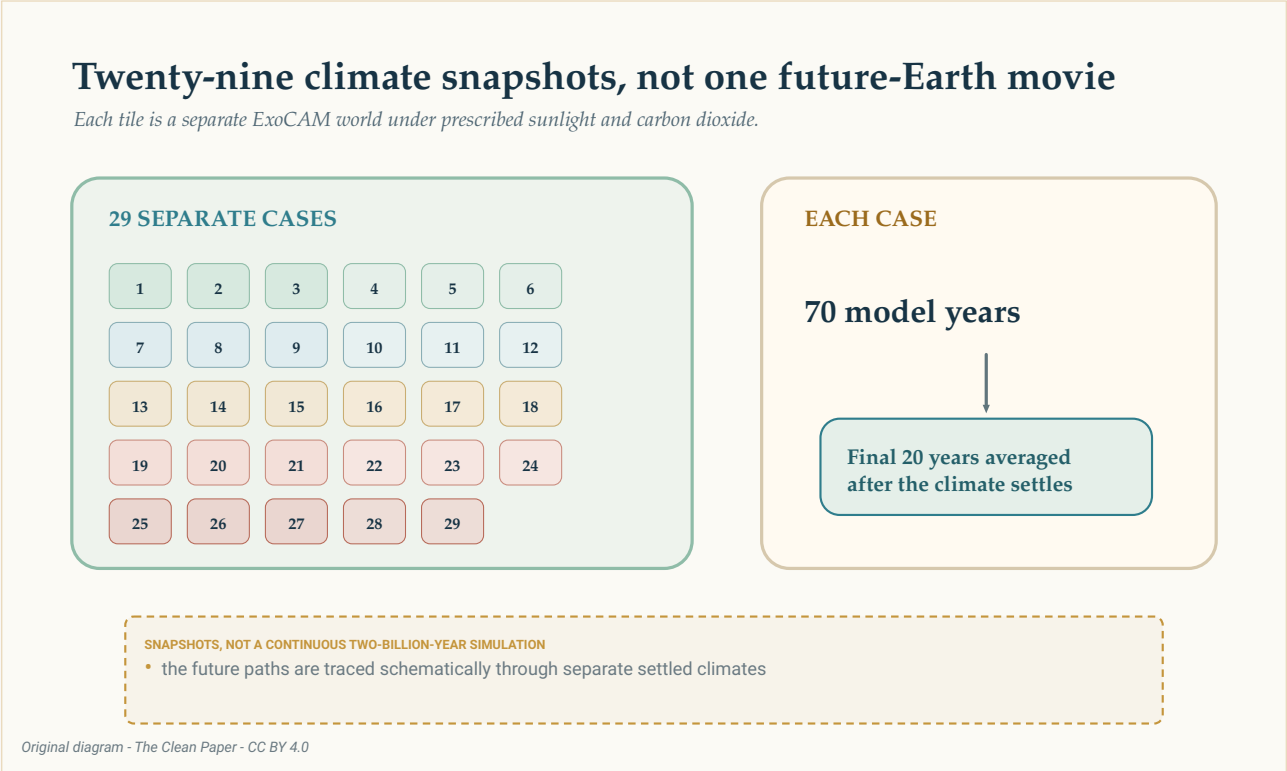
ID на случая	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625

ID на случая	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

Моделната Земя е разпознаваема, но съзнателно ограничена. Тя е с размерите на Земята и използва днешната география. Има опростен океан тип „плоча“, а не напълно циркулиращ океан, атмосферно налягане, зададено приблизително на днешната земна стойност (един бар), и фиксиран метан. Орбитата ѝ е идеално кръгова (нулев ексцентрицитет), а оста на въртене няма наклон (нулев обликвитет). Няма изрично представени почви, растителност или обратна връзка от променяща се биосфера. Най-важното е, че климатичният модел не е динамично свързан с модел на изветряне на скалите. С други думи, ExoCAM не изчислява изветрянето, не го използва за актуализиране на въглеродния диоксид и след това не изпълнява следващия климат в цикъл с обратна връзка. Вместо това изследователите задават двата гранични пътя и ги проследяват през климатичната решетка от 29 случая.

Какво означава „стационарно състояние“ в климатичен модел?

Случай в стационарно състояние е моделна климатична система, оставена да се установи при едно избрано Слънце и една атмосфера. Времето продължава да се изменя от ден на ден и от година на година в симулацията, но дългосрочните му средни стойности престават да се отместват силно.
Това е полезно за въпроса „Какъв климат съответства на тези условия?“. То е различно от прогнозиране на точния маршрут, по който реалната Земя преминава от един набор условия към следващия.



Всяка плочка е отделно изпълнение на ExoCAM за 70 моделни години, като последните 20 години са осреднени. Изследването взема проби от 29 установени климата при зададени условия на слънчева светлина и въглероден диоксид; то не симулира една непрекъснато развиваща се Земя в продължение на два милиарда години.

The Clean Paper CC BY 4.0

Краен случай едно: достатъчно въглероден диоксид, прекалено много топлина

В клона със слабо изветряне въглеродният диоксид остава фиксиран на 400 части на милион. С нарастването на слънчевата енергия топлината става ограничаващият фактор.

Статията използва два прага за глобалната средна температура, взети от по-ранни изследвания:

- При **323 келвина**, около **50 градуса по Целзий** като глобална годишна средна стойност, светът се приема за прекалено горещ за повечето сухоземни растения. Моделът достига този праг след около **1,68 милиарда години**.
- При **338 келвина**, около **65 градуса по Целзий** като глобална годишна средна стойност, светът се приема за прекалено горещ за всички сухоземни растения. Моделът достига този праг след около **1,87 милиарда години**.

Това са приети биологични граници, а не универсални температури, при които непременно се проваля всеки фотосинтезиращ организъм. Глобалната средна стойност прикрива и големи регионални разлики. Изследването разглежда отделно къде комбинациите от температура и вода могат да останат подходящи, но един етикет върху климатична карта не може да опише всички бъдещи убежища или адаптации.

Краен случай две: поносима температура, прекалено малко въглероден диоксид

В клона със силно изветряне глобалната средна температура се задържа на 288 келвина, около 15 градуса по Целзий, докато атмосферният въглероден диоксид намалява. Тук отговорът зависи от това колко малко въглерод могат да използват различните фотосинтетични пътища.

- При традиционния праг от **10 части на милион** — 10 молекули въглероден диоксид на всеки милион атмосферни молекули — границата за C4 фотосинтезата настъпва след около **1,35 милиарда години**. C4 фотосинтезата се използва от растения, включително царевица и захарна тръстика, и концентрира въглеродния диоксид около ензима, който го фиксира.
- Използването на алтернативен C4 праг от **2,9 части на милион**, обсъждан в предишни изследвания, го измества до около **1,64 милиарда години**.
- Предпазлив праг от **1 част на милион**, свързан с възможното оцеляване на някои CAM растения — растения, използващи метаболизъм на красулацеевата киселина, който отделя поглъщането на въглероден диоксид през нощта от използването му през деня — или на водни растения, способни да използват разтворен бикарбонат, го измества до около **1,84 милиарда години**.

Последното число има най-голямата биологична уговорка. Авторите изрично наричат границата от една част на милион предположителна. Тя не е експериментално установен праг за оцеляване на всички CAM растения или водна растителност при условията на бъдещата Земя.

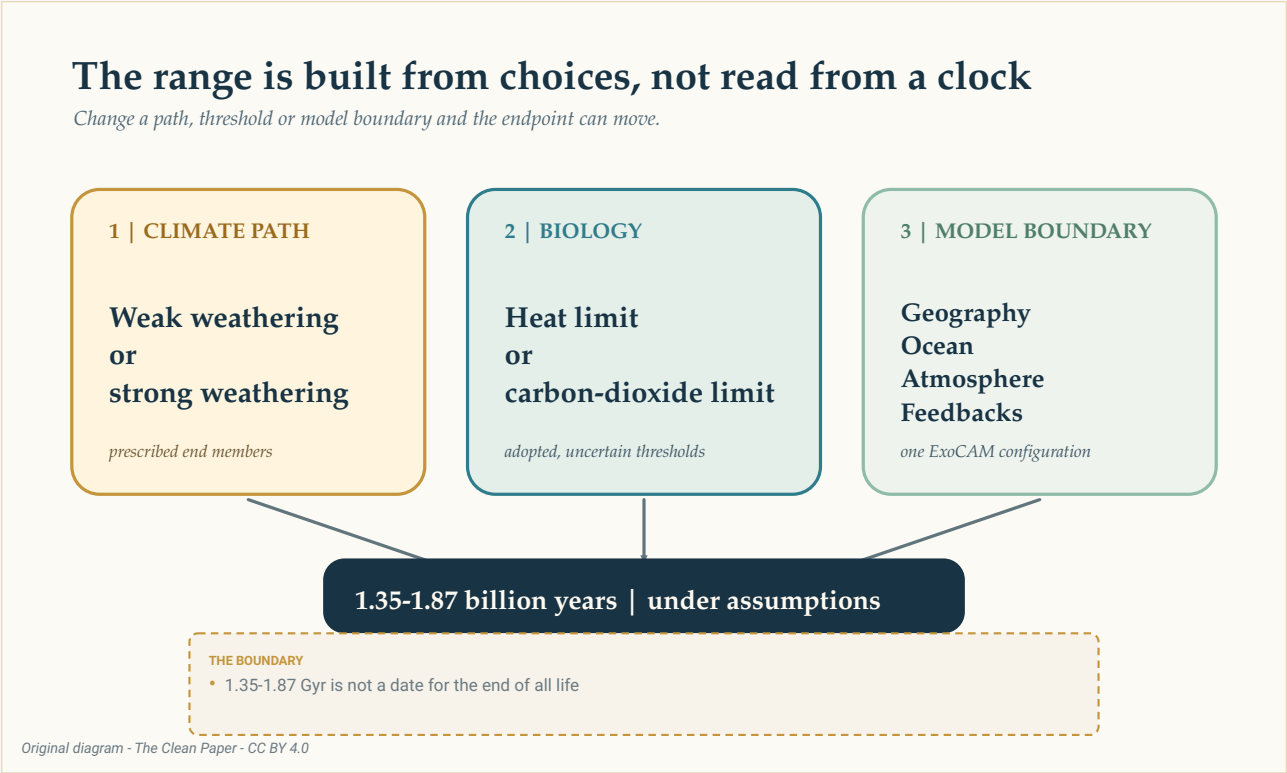
> **C3, C4 и CAM са стратегии, не стълбица**
>
> Растенията използват различни биохимични пътища за улавяне на въглерод. **C3 фотосинтезата** е най-разпространената. **C4 фотосинтезата**, използвана от растения като царевицата и захарната тръстика, концентрира въглеродния диоксид около ензима, който фиксира въглерода, и може да работи по-добре, когато въглеродният диоксид е оскъден. **Метаболизмът на красулацеевата киселина (CAM)** разделя поглъщането и използването на въглерод между нощта и деня, което помага на много растения да пестят вода.

> Това са семейства от стратегии с много разлики между видовете, а не последователни нива на „по-добри“ растения. Много ниските прагове на въглероден диоксид в статията са допускания за изследване на възможни граници, а не гаранции, че бъдеща екосистема ще еволюира така, че да ги използва.

Защо 1,86 милиарда години не е срок на годност

Често цитираното в статията число от около **1,86 милиарда години** е средната стойност на двете оптимистични горни крайни точки: 1,84 милиарда години в клона, ограничен от въглеродния диоксид, и 1,87 милиарда години в клона, ограничен от топлината. Това е компактно обобщение на два различни сценария. Не е трети моделен резултат с по-голяма точност и не е най-добра оценка на дата.

Дори по-широкият диапазон от 1,35 до 1,87 милиарда години няма една обща вероятност. Долната и горната му стойност зависят от различни допускания за изветрянето, различни биологични прагове и една конфигурация на климатичния модел. Диапазонът измерва избора в експеримента почти толкова, колкото измерва времето.



Диапазонът от 1,35 до 1,87 милиарда години възниква едва след избор на път за изветрянето, биологичен праг и граници на модела. Това е карта на допусканията, а не часовник до изчезването на целия живот.

The Clean Paper CC BY 4.0

Други граници може да бъдат достигнати по-рано

Най-дългите оценки за растителната биосфера се доближават до отделна и несигурна граница: влажен или неудържим парников ефект, който може да доведе до голяма загуба на океанска вода. Климатичните модели се разминават значително относно това кога тези състояния започват при нарастваща слънчева светлина, особено далеч от днешните условия. Някои оценки ги поставят преди най-оптимистичната граница на фотосинтезата.

Това означава, че горният клон не може да се чете като обещание, че Земята ще запази океаните си, познатите континенти или обитаемите повърхностни условия до 1,87 милиарда години от днес. Моделът не включва и бъдеща тектоника на плочите, промени в площта на сушата, еволюиращи екосистеми или напълно динамичен океан. Изчисленията му за това как атмосферата поглъща и излъчва енергия също се прилагат в режими на силно слънчево облъчване и изключително нисък въглероден диоксид, при които различните модели се разминават.

Еволюционната адаптация и технологичната намеса се появяват в обсъждането на статията като възможности. Те не са резултати от 29-те климатични симулации. Моделът не показва бъдещи организми, които еволюират фотосинтетичен път при една част на милион, и не показва цивилизация, управляваща атмосферата в продължение на милиард години.

Това не е резултат за днешната климатична криза

Увеличаването на яркостта на Слънцето действа в течение на стотици милиони до милиарди години. Съвременното затопляне, причинено от човека, произтича от бързо увеличаващи се парникови газове в течение на десетилетия и векове. Това са различни въздействия, на коренно различни времеви мащаби, които отговарят на различни въпроси.

Нищо в това изследване не отслабва доказателствата за настоящото изменение на климата и не е аргумент за отлагане на действията. Биосфера, която може да запази някакъв фотосинтетичен живот в един далечен моделен сценарий, не е същото като климат, в който днешните общества и екосистеми са в безопасност.

Статията е ценна, защото прави един далечен въпрос по-дисциплиниран. Тя показва, че по-ранни, по-прости модели може да са давали прекомерно затопляне, когато слънчевата светлина се увеличава, а въглеродният диоксид остава фиксиран, и че фотосинтетичният живот може да има повече пътища за оцеляване, отколкото предполага един каноничен въглероден праг. Тя показва и защо всяка допълнителна част от милиард години идва с цяла верига от допускания.

Слънцето, което храни листа, бавно се променя. Дали Земята ще остане зелена още

1,35, 1,87 или друг брой милиарди години, ще зависи от съвместния отговор на скалите, водата, атмосферата и живота. Честният резултат не е дата. Той е по-широк поглед към този компромис.

Накратко

Триизмерно климатично изследване пита колко дълго може да се запази растителната — фотосинтетична — биосфера на Земята, докато Слънцето бавно става по-ярко. Изследователите изчисляват 29 отделни климата в стационарно състояние и проследяват през тях два илюстративни крайни случая. При слабо изветряне и въглероден диоксид, фиксиран на 400 части на милион, приетите топлинни граници за сухоземните растения настъпват след около 1,68 и 1,87 милиарда години. При силно изветряне и глобална средна температура, фиксирана на 288 келвина, около 15 градуса по Целзий, приетите граници на въглеродния диоксид за фотосинтезата настъпват след около 1,35, 1,64 и — при използване на предположителен праг — 1,84 милиарда години. Често цитираното число 1,86 милиарда години е просто закръглената средна стойност на двете оптимистични горни крайни точки. Това са зависими от сценария моделни диапазони, а не дата, на която ще свършат Земята, човечеството или целият живот. Моделът използва зададени пътища, днешна география, океан тип „плоча“ и няма изрична връзка почва–растителност или климат–изветряне; най-дългите оценки се доближават до несигурни граници за парников ефект и загуба на океаните.

Проверка без увъртане

Какво показва статията: В тази конфигурация на ExoCAM триизмерните климати като цяло се затоплят по-слабо при увеличаваща се слънчева светлина и фиксиран въглероден диоксид, отколкото опростените модели, използвани за сравнение. При два зададени крайни случая на изветряне и няколко приети биологични прага границите за растителната биосфера се намират приблизително между 1,35 и 1,87 милиарда години от днес.

Какво е правдоподобно, но неустановено: Че някои CAM растения или водни растения, използващи разтворен бикарбонат, биха могли да поддържат фотосинтеза при около една част на милион атмосферен въглероден диоксид; че адаптацията или технологиите могат допълнително да удължат фотосинтетичния живот; и че реалният път климат–изветряне ще остане между двата крайни случая на модела.

Какво не показва: Фиксирана дата за края на всички растения, целия живот, човешката цивилизация, океаните на Земята или планетата; една непрекъсната симулация на следващите два милиарда години; или каквато и да е причина да се подценява настоящото изменение на климата, причинено от човека.

Основни ограничения: Двадесет и девет случая в стационарно състояние от едно семейство климатични модели; зададени, а не динамично свързани пътища на изветряне; днешна география; океан тип „плоча“; фиксиран метан; нулев обликвитет и ексцентрицитет; липса на изрично представени почви, растителност или обратна връзка от биосферата; несигурни прагове за топлина и въглероден диоксид; и голямо разминаване между моделите близо до условията на влажен и неудържим парников ефект.

Колко доверие трябва да има един неспециалист? Високо доверие, че изследването разширява правдоподобния моделен диапазон и посочва допусканията, които го определят. Умерено доверие в числовия диапазон като полезна рамка в този модел. Ниско доверие във всяка точна дата, защото най-далечните крайни точки зависят от съзнателно екстремни климатични пътища и несигурна биология.

Източници

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