The Clean Paper

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

Як довго Земля може залишатися зеленою? Кліматична модель дає діапазони, а не дату кінця світу

Двадцять дев'ять тривимірних кліматичних симуляцій розміщують різні межі фотосинтетичної біосфери Землі приблизно між 1,35 і 1,87 мільярда року від сьогодні. Значення залежать від навмисно спрощених шляхів вивітрювання порід, тепла й найнижчих рівнів вуглекислого газу, які можуть використовувати рослини. Вони не прогнозують кінець усіх рослин, усього життя, цивілізації чи планети.

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

Як довго Земля може залишатися зеленою? Кліматична модель дає діапазони, а не дату кінця світу

Листок існує в межах вузької угоди. Йому потрібні світло, вода, вуглекислий газ і температура, яку витримує його хімія. Протягом людського життя Сонце здається незмінною частиною цієї угоди. Протягом мільярда років — ні.

Старіючи на головній послідовності, Сонце повільно стає яскравішим. Більше сонячного світла нагріває Землю, але планета має довгострокову відповідь: реакції між дощовою водою, вуглекислим газом і силікатними породами можуть видаляти вуглекислий газ з атмосфери. Це послаблює парниковий ефект і компенсує частину нагрівання. Та сама відповідь, яка охолоджує планету, зрештою може позбавити фотосинтетичні організми вуглецю, з якого вони будують живу тканину.

Нова стаття в Journal of Geophysical Research: Atmospheres запитує, яка межа може настати першою: надмірна спека чи надто мало вуглекислого газу. Її відповідь — не дата смерті Землі. За двома навмисно спрощеними шляхами майбутнього прийняті межі для фотосинтетичного життя лежать приблизно між **1,35 і 1,87 мільярда року від сьогодні**.

Цей діапазон стосується **рослинної біосфери**: частини живої системи Землі, яку підтримують фотосинтетичні організми, особливо рослини й інше життя, що перетворює світло та вуглекислий газ на біологічний матеріал. Це не прогноз для кожного мікроба. Не тривалість людської цивілізації. І не тривалість існування планети.

Планетарний термостат має два невизначені налаштування

Центральна невизначеність — **силікатне вивітрювання**. Вуглекислий газ розчиняється в дощовій воді, реагує із силікатними породами й зрештою переноситься до океанів та осадів. Вулкани повертають вуглекислий газ протягом геологічного часу. Разом ці процеси утворюють частину карбонатно-силікатного циклу, який часто описують як планетарний термостат.

У теплішому й вологішому світі вивітрювання може прискоритися й швидше видаляти вуглекислий газ. Але науковці не знають, наскільки сильно така відповідь керуватиме Землею під яскравішим майбутнім Сонцем. Тому Джейкоб Гакк-Місра й Ерік Вулф не обрали один нібито правильний шлях. Вони змоделювали два **граничні випадки**: навмисно крайні сценарії, що обрамляють невизначеність.

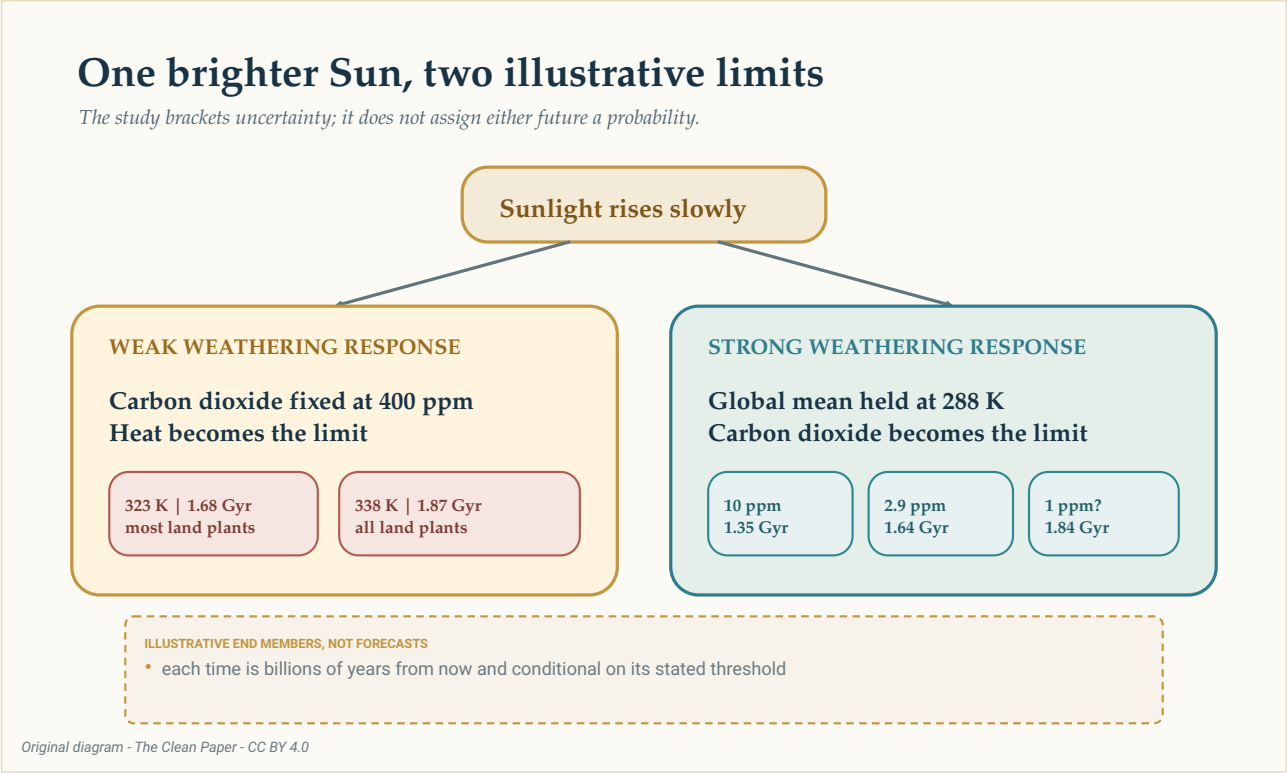
- У **граничному випадку слабкого вивітрювання** атмосферний вуглекислий газ залишається на рівні 400 частин на мільйон, а яскравіше Сонце підвищує температуру.
- У **граничному випадку сильного вивітрювання** середня глобальна температура

поверхні залишається 288 кельвінів, близько 15 °C, а вміст вуглекислого газу зменшується зі зростанням сонячного освітлення.

Жодну гілку не подано як справжнє майбутнє Землі. Перша запитує, що зробить спека, якщо вуглекислий газ залишиться високим. Друга — що зробить вуглецеве голодування, якщо вивітрювання утримуватиме глобальну температуру близькою до сучасного середнього.

Як вивітрювання може діяти як термостат?

Аналогія стосується зворотного зв'язку, а не буквальної ручки керування. Коли тепліший клімат прискорює хімічне вивітрювання, більше атмосферного вуглекислого газу може опинитися в розчинених речовинах, мінералах та осадах. Видалення цього парникового газу протидіє частині початкового нагрівання. На дуже довгих часових масштабах вулканічне виділення повертає вуглекислий газ. Сила кожної ланки залежить від опадів, відкритих порід, ерозії, біології, тектоніки й хімії океану. Саме тому стаття перевіряє граничні відповіді, а не ставиться до термостата як до відомої машини.



Стаття обрамляє невизначене майбутнє двома ілюстративними граничними випадками. Якщо вивітрювання реагує слабко, зростання спеки досягає прийнятих порогів для наземних рослин. Якщо сильно — падіння вуглекислого газу досягає прийнятих порогів фотосинтезу. Це умовні модельні гілки, а не ймовірності чи дати зворотного відліку.

The Clean Paper CC BY 4.0

Двадцять дев'ять усталених модельних світів, а не один двомільярднорічний фільм

Дослідники використали ExoCAM, тривимірну глобальну кліматичну модель, щоб обчислити **29 кліматів у стаціонарному стані** за різних поєднань сильнішого сонячного освітлення й нижчого вмісту вуглекислого газу. Кожен випадок моделювали протягом 70 модельних років. Тут модельний рік — один симульований річний цикл за незмінних умов: це час, потрібний штучному клімату для встановлення, а не один крок у річному прогнозі майбутньої Землі. Після встановлення змодельованого клімату усереднювали останні 20 років.

Ці 29 випадків — окремі модельні світи. Кожен запуск є однією точкою сітки й відповідає на запитання: «Який усталений клімат відповідає цьому обраному поєднанню сонячного освітлення й вуглекислого газу?» Комп'ютер не починав із сучасної Землі й не розвивав безперервно її атмосферу, породи, океани та живі організми протягом наступних двох мільярдів років. Натомість автори провели два схематичні шляхи вивітрювання через ці заздалегідь обчислені точки; проміжки між точками не симулювалися.

Таблиця відтворює поєднання сонячного освітлення й вуглекислого газу з офіційного архіву модельних даних. Ідентифікатори випадків додано тут для зручності в порядку архіву. **S/S0** — відносна сонячна стала: вхідна сонячна енергія в моделі, поділена на її сучасне значення S0. Значення 1,2 означає на 20% більше вхідної сонячної енергії, ніж сьогодні. **CO2 (ppm)** — частка атмосферного вуглекислого газу в молекулах на мільйон молекул атмосфери.

Випадок	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

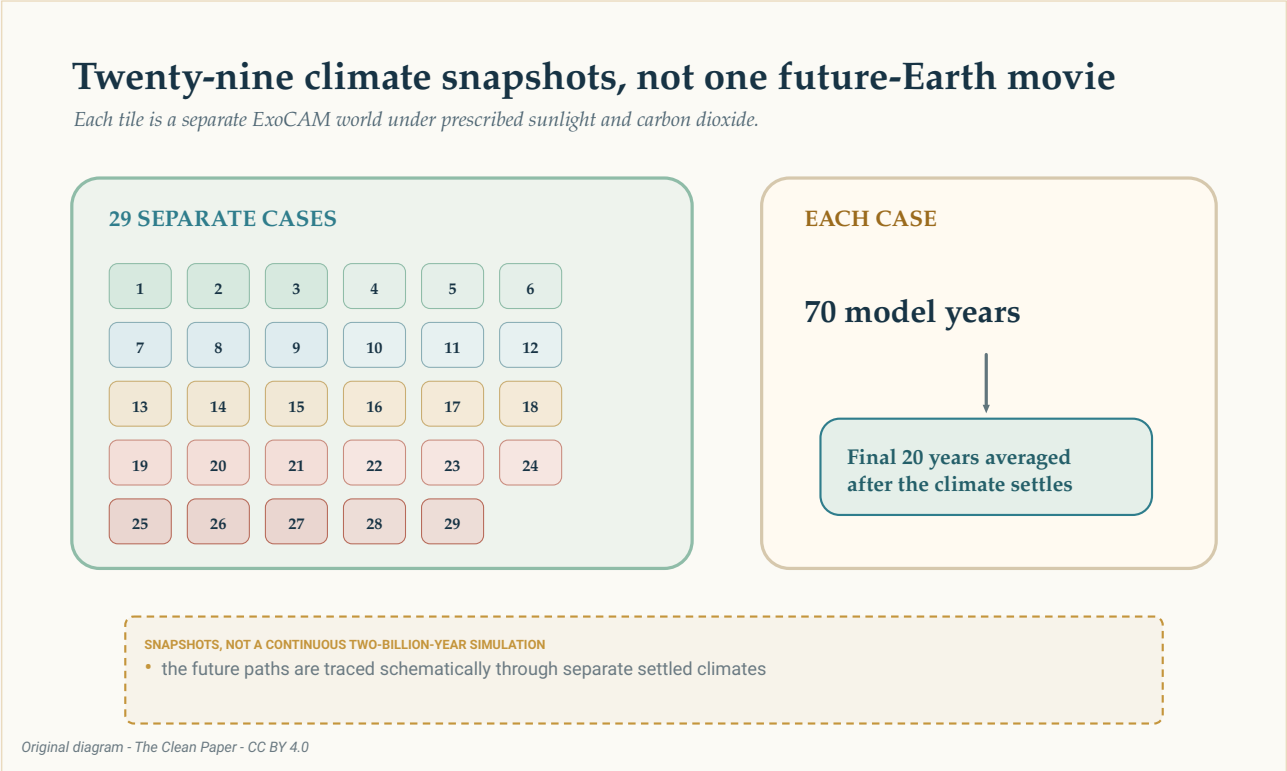
Випадок	S/S0	CO2 (ppm)
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

Модельна Земля впізнавана, але навмисно обмежена. Вона має розмір Землі й сучасну географію. Замість повністю циркулюючого океану використано спрощений океан-шар, атмосферний тиск установлено приблизно на сучасному земному рівні — один бар, а метан зафіксовано. Орбіта ідеально кругова, з нульовим ексцентриситетом, а вісь обертання не має нахилу, тобто нульова похилість. Немає явних ґрунтів, рослинності чи зворотного зв'язку від змінної біосфери. Найважливіше: кліматична модель не поєднана динамічно з моделлю вивітрювання порід. Іншими словами, ExoCAM не обчислює вивітрювання, не використовує його для оновлення вуглекислого газу й не запускає наступний клімат у циклі зворотного зв'язку. Натомість дослідники задали два граничні шляхи й провели їх через кліматичну сітку з 29 випадків.

Що означає «стаціонарний стан» у кліматичній моделі?

Випадок стаціонарного стану — це модельний клімат, якому дали встановитися за одного обраного Сонця й атмосфери. Погода всередині симуляції й далі змінюється від дня до дня й року до року, але довгострокові середні перестають сильно дрейфувати.

Це корисно для запитання «який клімат відповідає цим умовам?» Але відрізняється від прогнозування точного шляху, яким реальна Земля переходить від одного набору умов до наступного.



Кожна плитка — окремий запуск ExoCAM на 70 модельних років із усередненням останніх 20 років. Дослідження вибрало 29 усталених кліматів за заданих умов сонячного освітлення й вуглекислого газу; воно не симулювало одну Землю, що безперервно змінюється два мільярди років.

The Clean Paper CC BY 4.0

Граничний випадок перший: достатньо вуглекислого газу, надто багато спеки

У гілці слабкого вивітрювання вуглекислий газ залишається зафіксованим на рівні 400 частин на мільйон. Зі зростанням сонячного потоку обмежувальним чинником стає спека.

Стаття використовує два пороги середньої глобальної температури з попередніх робіт:

- За **323 кельвінів**, близько **50 °C** як глобального річного середнього, світ вважають надто гарячим для більшості наземних рослин. Модель досягає цього порога приблизно через **1,68 мільярда року**.
- За **338 кельвінів**, близько **65 °C** як глобального річного середнього, світ вважають надто гарячим для всіх наземних рослин. Модель досягає цього порога приблизно через **1,87 мільярда року**.

Це прийняті біологічні межі, а не універсальні температури, за яких обов’язково відмовляє кожен фотосинтетичний організм. Глобальне середнє також приховує

великі регіональні відмінності. Дослідження окремо розглядає, де поєднання температури й води може залишатися придатним, але позначка на кліматичній карті не може перелічити всі майбутні прихистки чи адаптації.

Граничний випадок другий: придатна температура, надто мало вуглекислого газу

У гілці сильного вивітрювання середня глобальна температура утримується на рівні 288 кельвінів, близько 15 °C, а атмосферний вуглекислий газ падає. Тут відповідь залежить від того, наскільки мало вуглецю можуть використовувати різні шляхи фотосинтезу.

- За традиційного порога **10 частин на мільйон** — 10 молекул вуглекислого газу на мільйон молекул атмосфери — межа для фотосинтезу C4 настає приблизно через **1,35 мільярда року**. Фотосинтез C4 використовують, зокрема, кукурудза й цукрова тростина; він концентрує вуглекислий газ навколо ферменту, що його фіксує.
- Використання альтернативного порога C4 **2,9 частини на мільйон**, обговореного в попередній роботі, переносить межу приблизно до **1,64 мільярда року**.
- Попередній поріг **1 частина на мільйон**, пов'язаний із можливою стійкістю деяких CAM-рослин — рослин із метаболізмом красулових кислот, що розділяє поглинання вуглекислого газу вночі та його використання вдень, — або водних рослин, здатних використовувати розчинений бікарбонат, переносить її приблизно до **1,84 мільярда року**.

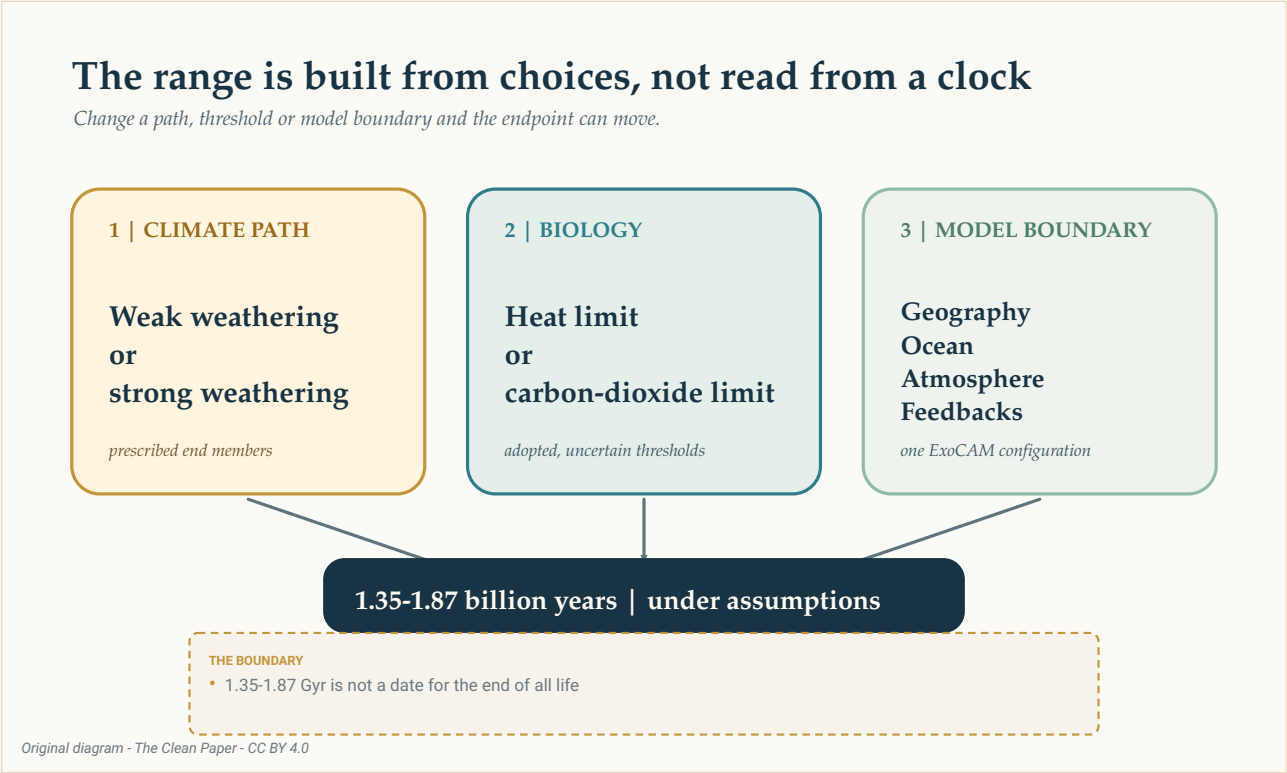
Останнє число має найбільше біологічне застереження. Автори прямо називають межу одну частину на мільйон попередньою. Це не експериментально встановлений поріг виживання для всіх CAM-рослин чи водної рослинності за умов майбутньої Землі.

> **C3, C4 і CAM — це стратегії, а не сходи**
>
> Рослини використовують різні біохімічні шляхи захоплення вуглецю. **Фотосинтез C3** є найпоширенішим. **Фотосинтез C4**, який використовують, зокрема, кукурудза й цукрова тростина, концентрує вуглекислий газ навколо ферменту, що фіксує вуглець, і може краще працювати за його дефіциту. **Метаболізм красулових кислот (CAM)** розділяє поглинання та використання вуглецю між ніччю й днем, допомагаючи багатьом рослинам зберігати воду.
> Це родини стратегій із багатьма відмінностями між видами, а не послідовні ранги «кращих» рослин. Дуже низькі пороги вуглекислого газу в статті — припущення для дослідження можливих меж, а не гарантія, що майбутня екосистема еволюціонує до їх використання.

Чому 1,86 мільярда року — не строк придатності

Заголовкова оцінка статті близько **1,86 мільярда року** є середнім двох оптимістичних верхніх кінцевих точок: 1,84 мільярда року в гілці, обмеженій вуглекислим газом, і 1,87 мільярда року в гілці, обмеженій спекою. Це стислий підсумок двох різних сценаріїв. Не третій модельний результат із більшою точністю й не найкраща оцінка дати.

Навіть ширший проміжок 1,35–1,87 мільярда року не має однієї ймовірності. Його нижнє й верхнє значення залежать від різних припущень про вивітрювання, різних біологічних порогів і однієї конфігурації кліматичної моделі. Діапазон вимірює вибір в експерименті не менше, ніж час.



Проміжок 1,35–1,87 мільярда року виникає лише після вибору шляху вивітрювання, біологічного порога й меж моделі. Це карта припущень, а не годинник до вимирання всього життя.

The Clean Paper CC BY 4.0

Інші межі можуть настати раніше

Найдовші оцінки рослинної біосфери наближаються до окремої невизначеної межі: вологого або неконтрольованого парникового ефекту, здатного спричинити значну втрату океану. Кліматичні моделі істотно не погоджуються щодо того, коли такі стани починаються зі зростанням сонячного освітлення, особливо далеко від сучасних умов. Деякі оцінки розміщують їх раніше за найоптимістичнішу межу фотосинтезу.

Тому верхню гілку не можна читати як обіцянку, що Земля збереже океани, знайомі континенти чи придатні поверхневі умови до 1,87 мільярда року від сьогодні. Модель також не включає майбутню тектоніку плит, зміни площі суші, еволюцію екосистем чи повністю динамічний океан. Її розрахунки поглинання й випромінювання енергії атмосферою також заходять у режими сильного сонячного освітлення та надзвичайно низького вмісту вуглекислого газу, де різні моделі розходяться.

Еволюційна адаптація й технологічне втручання з'являються в обговоренні як можливості. Вони не є результатами 29 кліматичних симуляцій. Модель не показує, що майбутні організми еволюціонують до фотосинтетичного шляху за однієї частини на мільйон, і не показує цивілізацію, яка керує атмосферою мільярд років.

Це не результат про сучасну кліматичну кризу

Сонячне яскравішання діє протягом сотень мільйонів і мільярдів років. Сучасне спричинене людиною потепління походить від швидкого зростання парникових газів протягом десятиліть і століть. Це різні примуси на радикально різних часових масштабах, що відповідають на різні питання.

Ніщо в цьому дослідженні не послаблює докази сучасної зміни клімату й не виправдовує відкладання дій. Біосфера, яка за одним далеким модельним сценарієм може зберегти частину фотосинтетичного життя, — не те саме, що клімат, у якому безпечні сучасні суспільства й екосистеми.

Стаття цінна тим, що дисциплінує віддалене питання. Вона показує, що раніші простіші моделі могли надмірно нагріватися, коли сонячне освітлення зростало, а вуглекислий газ залишався незмінним, і що фотосинтетичне життя може мати більше шляхів до збереження, ніж припускає один канонічний поріг вуглецю. Вона також показує, чому кожна додаткова частка мільярда років пов'язана з ланцюгом припущень.

Сонце, яке живить листок, повільно змінюється. Чи залишатиметься Земля зеленою ще 1,35, 1,87 або іншу кількість мільярдів років, залежатиме від спільної відповіді порід, води, атмосфери й життя. Чесний результат — не дата. Це ширший погляд на угоду.

Короткий підсумок

Тривимірне кліматичне дослідження запитує, як довго рослинна — фотосинтетична — біосфера Землі може зберігатися, коли Сонце повільно яскравішає. Дослідники обчислили 29 окремих кліматів у стаціонарному стані й провели через них два ілюстративні граничні випадки. За слабкого вивітрювання й вуглекислого газу, зафіксованого на 400 частинах на мільйон, прийняті теплові межі для наземних

рослин настають приблизно через 1,68 і 1,87 мільярда року. За сильного вивітрювання й глобальної середньої температури 288 кельвінів, близько 15 °C, прийняті межі вуглекислого газу для фотосинтезу настають приблизно через 1,35, 1,64 і, з попереднім порогом, 1,84 мільярда року. Часто цитовані 1,86 мільярда року — лише округлене середнє двох оптимістичних верхніх кінцевих точок. Це залежні від сценарію модельні діапазони, а не дата завершення Землі, людства чи всього життя. Модель використовує задані шляхи, сучасну географію, океан-шар, не має явного зв'язку ґрунт—рослинність або клімат—вивітрювання, а найдовші оцінки наближаються до невизначених меж парникового ефекту й втрати океану.

Твереза оцінка

Що показує стаття: у цій конфігурації ExoCAM тривимірні кліматичні моделі загалом нагріваються менше за зростання сонячного освітлення й незмінного вуглекислого газу, ніж спрощені моделі порівняння. За двома заданими граничними випадками вивітрювання й кількома прийнятими біологічними порогами межі рослинної біосфери лежать приблизно між 1,35 і 1,87 мільярда року від сьогодні.

Що правдоподібне, але не встановлене: що деякі CAM-рослини або водні рослини, які використовують розчинений бікарбонат, можуть підтримувати фотосинтез біля однієї частини на мільйон атмосферного вуглекислого газу; що адаптація або технологія можуть продовжити фотосинтетичне життя; що реальний шлях клімату й вивітрювання залишатиметься між двома модельними граничними випадками.

Чого робота не показує: фіксованої дати кінця всіх рослин, усього життя, людської цивілізації, океанів Землі чи планети; однієї безперервної симуляції наступних двох мільярдів років; або будь-якої причини применшувати сучасну спричинену людиною зміну клімату.

Головні обмеження: 29 стаціонарних випадків з однієї родини кліматичних моделей; задані, а не динамічно пов'язані шляхи вивітрювання; сучасна географія; океан-шар; зафіксований метан; нульові нахил осі й ексцентриситет; відсутність явних ґрунтів, рослинності чи зворотного зв'язку біосфери; невизначені теплові й вуглекислотні пороги; значні розбіжності моделей біля вологого й неконтрольованого парникового ефекту.

Якою має бути впевненість звичайного читача? Високою в тому, що дослідження розширює правдоподібний модельний діапазон і визначає припущення, які ним керують. Помірною щодо числового проміжку як корисної рамки всередині цієї моделі. Низькою щодо будь-якої точної дати, бо найдальші кінцеві точки залежать від навмисно крайніх кліматичних шляхів і невизначеної біології.

Джерела

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