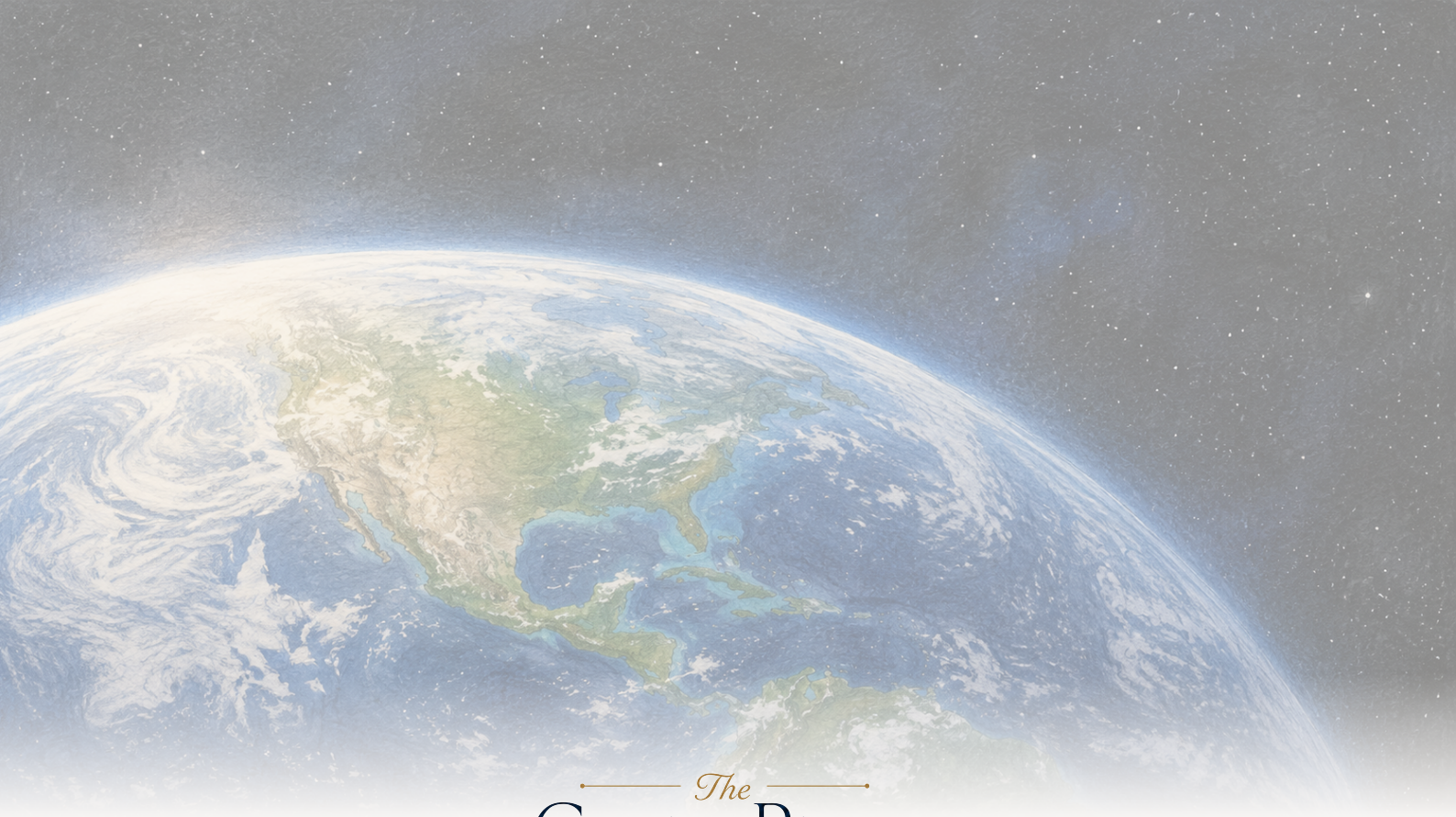


The Clean Paper

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

Որքա՞ն երկար կարող է Երկիրը կանաչ մնալ: Կլիմայական մոդելը տալիս է միջակայքներ, ոչ աշխարհի վերջի ամսաթիվ

Քսանինը եռաչափ կլիմայական սիմուլյացիաներ Երկրի ֆոտոսինթեզային կենսոլորտի տարբեր սահմանները դնում են այսօրվանից մոտ 1.35–1.87 միլիարդ տարի հետո: Արժեքները կախված են ապարների հողմահարման, ջերմության և բույսերի հնարավոր նվազագույն ածխաթթու գազի մակարդակների համար դիտավորյալ պարզեցված ուղիներից: Դրանք չեն կանխատեսում, թե երբ կվերջանան բոլոր բույսերը, ամբողջ կյանքը, քաղաքակրթությունը կամ մոլորակը:

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

Որքա՞ն երկար կարող է Երկիրը կանաչ մնալ: Կլիմայական մոդելը տալիս է միջակայքներ, ոչ աշխարհի վերջի ամսաթիվ

Տերևը գոյություն ունի նեղ պայմանագրի ներսում: Նրան պետք են լույս, ջուր, ածխաթթու գազ և այնպիսի ջերմաստիճան, որին նրա քիմիան կարող է դիմանալ: Մարդու կյանքի ընթացքում Արեգակը այդ պայմանագրի անփոփոխ մասն է թվում: Միլիարդ տարվա մասշտաբում՝ ոչ:

Երբ Արեգակը հիմնական հաջորդականության վրա ծերանում է, այն դանդաղորեն ավելի պայծառ է դառնում: Ավելի շատ արևային լույսը տաքացնում է Երկիրը, բայց մոլորակը երկարաժամկետ պատասխան ունի. անձրևաջրի, ածխաթթու գազի և սիլիկատային ապարների միջև ռեակցիաները կարող են ածխաթթու գազը հեռացնել մթնոլորտից: Դա թուլացնում է ջերմոցային էֆեկտը և մասամբ հակազդում տաքացմանը: Սակայն նույն արձագանքը, որը սառեցնում է մոլորակը, ի վերջո կարող է ֆոտոսինթեզող օրգանիզմներին զրկել այն ածխածնից, որով նրանք կառուցում են կենդանի հյուսվածք:

Journal of Geophysical Research: Atmospheres-ի նոր հոդվածը հարցնում է, թե որ սահմանը կարող է առաջինը հասնել՝ չափազանց շատ ջերմությո՞ւնը, թե՞ չափազանց քիչ ածխաթթու գազը: Պատասխանը Երկրի «մահվան» ամսաթիվ չէ: Երկու դիտավորյալ պարզեցված ապագա ուղիներում ֆոտոսինթեզային կյանքի ընդունված սահմանները ընկնում են այսօրվանից մոտ **1.35–1.87 միլիարդ տարի հետո**:

Այդ միջակայքը վերաբերում է **բուսական կենսոլորտին**՝ Երկրի կենդանի համակարգի այն մասին, որը պահպանվում է ֆոտոսինթեզող օրգանիզմներով, հատկապես բույսերով և այն մյուս կյանքով, որը լույսն ու ածխաթթու գազը վերածում է կենսաբանական նյութի: Սա բոլոր մանրէների ապագայի կանխատեսում չէ: Սա մարդկային քաղաքակրթության տևողությունը չէ: Սա մոլորակի կյանքի տևողությունը չէ:

Մոլորակային «թերմոստատը» երկու անորոշ կարգավորում ունի

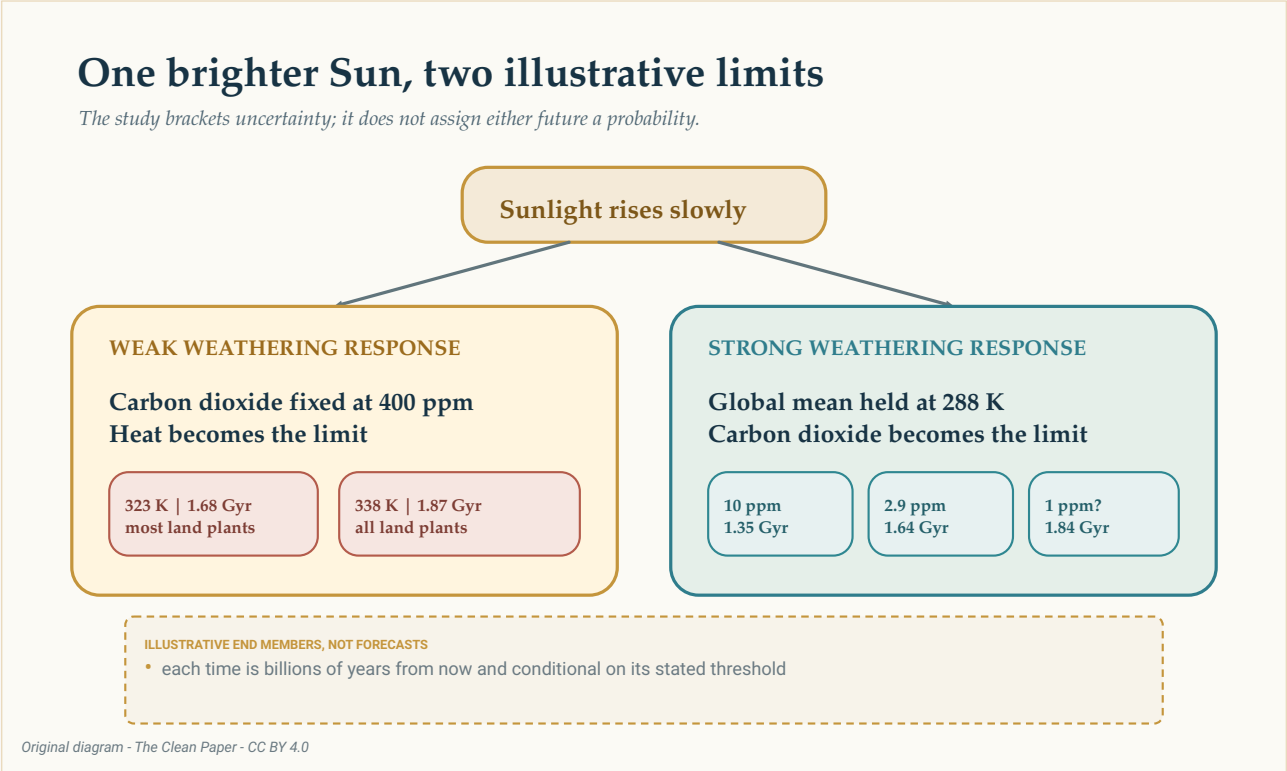
Կենտրոնական անորոշությունը **սիլիկատային հողմահարումն** է: Ածխաթթու գազը լուծվում է անձրևաջրում, արձագանքում սիլիկատային ապարների հետ և ի վերջո տեղափոխվում դեպի օվկիանոսներ ու նստվածքներ: Երկրաբանական ժամանակաշրջաններում հրաբուխները ածխաթթու գազը վերադարձնում են: Այս գործընթացները միասին կազմում են կարբոնատ–սիլիկատային ցիկլի մի մասը, որը հաճախ նկարագրվում է որպես մոլորակային թերմոստատ:

Ավելի տաք ու խոնավ աշխարհում հողմահարումը կարող է արագանալ և ավելի արագ հեռացնել ածխաթթու գազը։ Բայց գիտնականները չգիտեն, թե որքան ուժեղ այդ արձագանքը կվերահսկի Երկիրը ապագայի ավելի պայծառ Արեգակի պայմաններում։ Jacob Haqq-Misra-ն և Eric Wolf-ը այդ պատճառով չեն ընտրել մեկ ենթադրաբար «ճիշտ» ուղի։ Նրանք մոդելավորել են երկու **ծայրային անդամ՝** դիտավորյալ ծայրահեղ դեպքեր, որոնց նպատակն է շրջանակել անորոշությունը։

- **Թույլ հողմահարման ծայրային անդամում** մթնոլորտային ածխաթթու գազը մնում է 400 մաս միլիոնում, մինչ պայծառացող Արեգակը բարձրացնում է ջերմաստիճանը։
- **Ուժեղ հողմահարման ծայրային անդամում** մակերևույթի գլոբալ միջին ջերմաստիճանը մնում է 288 կելվին՝ մոտ 15 °C, մինչ արևային հոսքի աճին զուգընթաց ածխաթթու գազը նվազում է։

Ոչ մի ճյուղ չի ներկայացվում որպես Երկրի իրական ապագա։ Առաջինը հարցնում է՝ ինչ կաներ ջերմությունը, եթե ածխաթթու գազը բարձր մնար։ Երկրորդը՝ ինչ կաներ ածխածնային սովը, եթե հողմահարումը գլոբալ ջերմաստիճանը պահեր մոտ այսօրվա միջինին։

> **Ինչպե՞ս կարող է հողմահարումը թերմոստատի պես աշխատել**
>
> Նմանությունը վերաբերում է հետադարձ կապին, ոչ իրական կարգավորիչ կոճակին։ Երբ ավելի տաք կլիման արագացնում է քիմիական հողմահարումը, մթնոլորտային ավելի շատ ածխաթթու գազ կարող է հայտնվել լուծված նյութում, հանքանյութերում և նստվածքներում։ Այդ ջերմոցային գազի հեռացումը հակազդում է սկզբնական տաքացման մի մասին։ Շատ երկար ժամանակաշրջաններում հրաբխային գազազատումը ածխաթթու գազը վերադարձնում է։
> Յուրաքանչյուր օղակի ուժը կախված է տեղումներից, բաց ապարներից, էրոզիայից, կենսաբանությունից, տեկտոնիկայից և օվկիանոսի քիմիայից։ Ահա թե ինչու հոդվածը ստուգում է սահմանային արձագանքները՝ թերմոստատը հայտնի մեքենա համարելու փոխարեն։



Հոդվածը անորոշ ապագան շրջանակում է երկու ցուցադրական ծայրային անդամներով: Եթե հողմահարումը թույլ է արձագանքում, աճող ջերմությունը հասնում է ցամաքային բույսերի ընդունված շեմերին: Եթե ուժեղ է արձագանքում, նվազող ածխաթթու գազը հասնում է ֆոտոսինթեզի ընդունված շեմերին: Սրանք պայմանական մոդելային ճյուղեր են, ոչ հավանականություններ կամ հետհաշվարկի ամսաթվեր:

The Clean Paper CC BY 4.0

Քսանինը կայունացած մոդելային աշխարհ, ոչ մեկ երկումիլիարդամյա ֆիլմ

Հետազոտողները օգտագործել են ExoCAM եռաչափ գլոբալ կլիմայական մոդելը՝ ավելի ուժեղ արևային լույսի և ավելի ցածր ածխաթթու գազի տարբեր համակցություններով **29 կայուն վիճակի կլիմա** հաշվարկելու համար: Յուրաքանչյուր դեպք աշխատեցվել է 70 մոդելային տարի: Այստեղ մեկ մոդելային տարին ֆիքսված պայմաններում սիմուլացված մեկ տարեկան ցիկլ է. դա հաշվարկային ժամանակ է, որը թույլ է տալիս արհեստական կլիմային կայունանալ, ոչ Երկրի ապագայի տարեցտարի կանխատեսման մեկ քայլ: Վերջին 20 տարիները միջինացվել են այն բանից հետո, երբ սիմուլացված կլիման բավարար ժամանակ է ունեցել կայունանալու:

Այդ 29 դեպքերը առանձին մոդելային աշխարհներ են: Յուրաքանչյուր վազք ցանցի մեկ կետ է և պատասխանում է հարցին՝ «ինչպիսի՞ կայունացած կլիմա է համապատասխանում արևային լույսի և ածխաթթու գազի այս ընտրված զույգին»: Համակարգիչը չի սկսել այսօրվա Երկրից և չի զարգացրել նրա մթնոլորտը, ապարները,

օվկիանոսները և կենդանի աշխարհը հաջորդ երկու միլիարդ տարիների ընթացքում անընդհատ։ Փոխարենը հեղինակները նախապես հաշվարկված կետերի միջով անցկացրել են հողմահարման երկու սխեմատիկ ուղիները. կետերի միջև ուղին ինքնին չի սիմուլացվել։

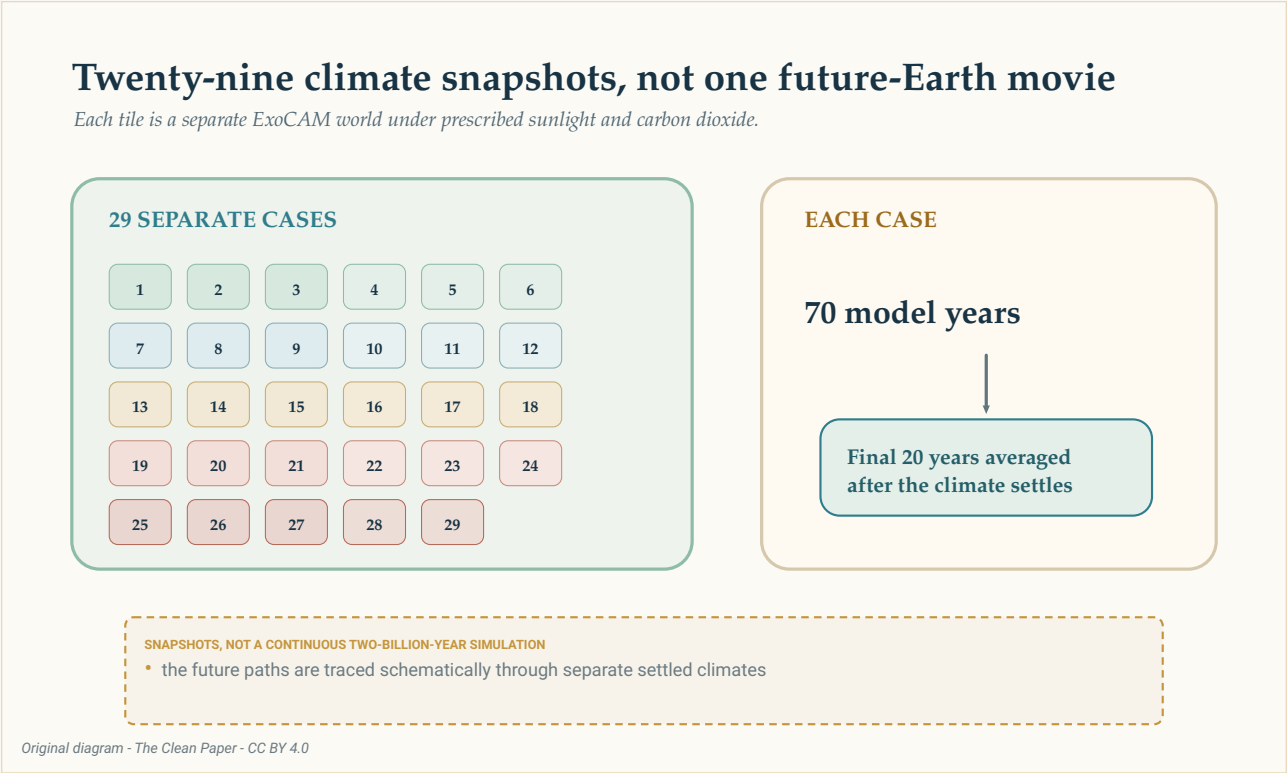
Աղյուսակը վերարտադրում է արևային հոսքի և ածխաթթու գազի համակցությունները պաշտոնական մոդելային տվյալների արխիվից։ Դեպքերի ID-ները ընթերցման համար այստեղ ավելացված նշումներ են՝ արխիվի հերթականությամբ։ **S/S0**-ն հարաբերական արևային հաստատունն է՝ մոդելում օգտագործված մուտքային արևային էներգիան բաժանած ներկա S0 արժեքին։ Այսպիսով, 1.2 նշանակում է 20% ավելի շատ մուտքային արևային էներգիա, քան այսօր։ **CO2 (ppm)**-ը մթնոլորտային ածխաթթու գազի խառնման հարաբերությունն է՝ մոլեկուլներ մեկ միլիոն մթնոլորտային մոլեկուլի հաշվով։

Դեպքի 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
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

Մոդելային Երկիրը ճանաչելի է, բայց դիտավորյալ սահմանափակված: Այն Երկրի չափն ունի և օգտագործում է ներկայիս աշխարհագրությունը: Լիարժեք շրջանառվող օվկիանոսի փոխարեն ունի պարզեցված slab ocean, մթնոլորտային ճնշումը սահմանված է մոտ Երկրի ներկա արժեքին՝ մեկ բար, իսկ մեթանը ֆիքսված է: Ուղեծիրը կատարյալ շրջանաձև է (էքսցենտրիսիտետը՝ զրո), իսկ պտտման առանցքը թեքություն չունի (օբլիկվիտետը՝ զրո): Մոդելը չունի հողի, բուսականության կամ փոփոխվող կենսոլորտի հետադարձ կապի բացահայտ ներկայացում: Ամենակարևորն այն է, որ կլիմայական մոդելը դինամիկորեն կապված չէ ապարների հողմահարման մոդելի հետ: Այլ կերպ՝ ExoCAM-ը չի հաշվարկում հողմահարումը, դրանով թարմացնում CO_2-ը և հետո հետադարձ կապի օղակում աշխատեցնում հաջորդ կլիման: Հետազոտողները փոխարենը սահմանել են երկու սահմանային ուղիներն ու անցկացրել դրանք 29 դեպքից բաղկացած կլիմայական ցանցի միջով:

Ի՞նչ է նշանակում «կայուն վիճակ» կլիմայական մոդելում

Կայուն վիճակի դեպքը մոդելային կլիմա է, որին թույլ են տալիս կայունանալ ընտրված Արեգակի և մթնոլորտի պայմաններում: Սիմուլյացիայի ներսում եղանակը դեռ օր օրի և տարեցտարի փոխվում է, բայց երկարաժամկետ միջինները դադարում են ուժեղ շեղվել:
Սա օգտակար է «ինչ կլիմա է համապատասխանում այս պայմաններին» հարցի համար: Դա տարբերվում է այն ճշգրիտ ուղու կանխատեսումից, որով իրական Երկիրը մի պայմաններից անցնում է մյուսներին:



Յուրաքանչյուր սալիկ առանձին ExoCAM կլիմայական վազք է՝ 70 մոդելային տարով, որի

վերջին 20 տարիները միջինացվել են: Ուսումնասիրությունը նմուշառել է 29 կայունացած կլիմա՝ սահմանված արևային հոսքի և ածխաթթու գազի պայմաններում. այն չի սիմուլացրել մեկ անընդհատ զարգացող Երկիր երկու միլիարդ տարվա ընթացքում:

The Clean Paper CC BY 4.0

Ծայրային անդամ մեկ. բավարար ածխաթթու գազ, չափազանց շատ ջերմություն

Թույլ հողմահարման ճյուղում ածխաթթու գազը ֆիքսված է 400 ppm-ի վրա: Արեգակնային մուտքի աճին զուգընթաց սահմանափակող գործոնը դառնում է ջերմությունը:

Հոդվածը օգտագործում է գլոբալ միջին ջերմաստիճանի երկու շեմ՝ վերցված նախորդ աշխատանքներից.

- **323 կելվինի** դեպքում՝ մոտ **50 °C** գլոբալ տարեկան միջին, աշխարհը համարվում է չափազանց տաք ցամաքային բույսերի մեծ մասի համար: Մոդելը այդ շեմին հասնում է մոտ **1.68 միլիարդ տարի հետո**:
- **338 կելվինի** դեպքում՝ մոտ **65 °C** գլոբալ տարեկան միջին, աշխարհը համարվում է չափազանց տաք բոլոր ցամաքային բույսերի համար: Մոդելը այդ շեմին հասնում է մոտ **1.87 միլիարդ տարի հետո**:

Սրանք ընդունված կենսաբանական սահմաններ են, ոչ համընդհանուր ջերմաստիճաններ, որոնց դեպքում յուրաքանչյուր ֆոտոսինթեզող օրգանիզմ անպայման դադարում է գործել: Գլոբալ միջինը նաև թաքցնում է մեծ տարածաշրջանային տարբերությունները: Ուսումնասիրությունը առանձին դիտարկում է, թե ջերմաստիճանի և ջրի որ համակցություններում կարող են մնալ հարմար տարածքներ, բայց կլիմայական քարտեզի պիտակը չի կարող հաշվառել ապագայի յուրաքանչյուր ապաստան կամ հարմարվողականություն:

Ծայրային անդամ երկու. տանելի ջերմություն, չափազանց քիչ ածխաթթու գազ

Ուժեղ հողմահարման ճյուղում գլոբալ միջին ջերմաստիճանը պահվում է 288 կելվին՝ մոտ 15 °C, իսկ մթնոլորտային ածխաթթու գազը նվազում է: Այստեղ պատասխանը կախված է նրանից, թե ֆոտոսինթեզի տարբեր ուղիները որքան քիչ ածխածին կարող են օգտագործել:

- Ավանդական **10 ppm** շեմի դեպքում՝ յուրաքանչյուր մեկ միլիոն մթնոլորտային

մոլեկուլում 10 CO_2 մոլեկուլ, C4 ֆոտոսինթեզի սահմանը հասնում է մոտ **1.35 միլիարդ տարի հետո**: C4 ֆոտոսինթեզը օգտագործում են, օրինակ, եգիպտացորենն ու շաքարեղեգը, և այն CO_2-ը կենտրոնացնում է ածխածին ֆիքսող ֆերմենտի շուրջ:
- Նախորդ աշխատանքներում քննարկված այլընտրանքային **2.9 ppm** C4 շեմը սահմանը տեղափոխում է մոտ **1.64 միլիարդ տարի հետո**:
- Նախնական **1 ppm** շեմը, որը կապվում է որոշ CAM բույսերի՝ crassulacean acid նյութափոխանակություն օգտագործող բույսերի, որոնք CO_2-ի ներծծումը գիշերը բաժանում են ցերեկային օգտագործումից, կամ լուծված բիկարբոնատ օգտագործելու ունակ ջրային բույսերի հնարավոր պահպանման հետ, սահմանը տեղափոխում է մոտ **1.84 միլիարդ տարի հետո**:

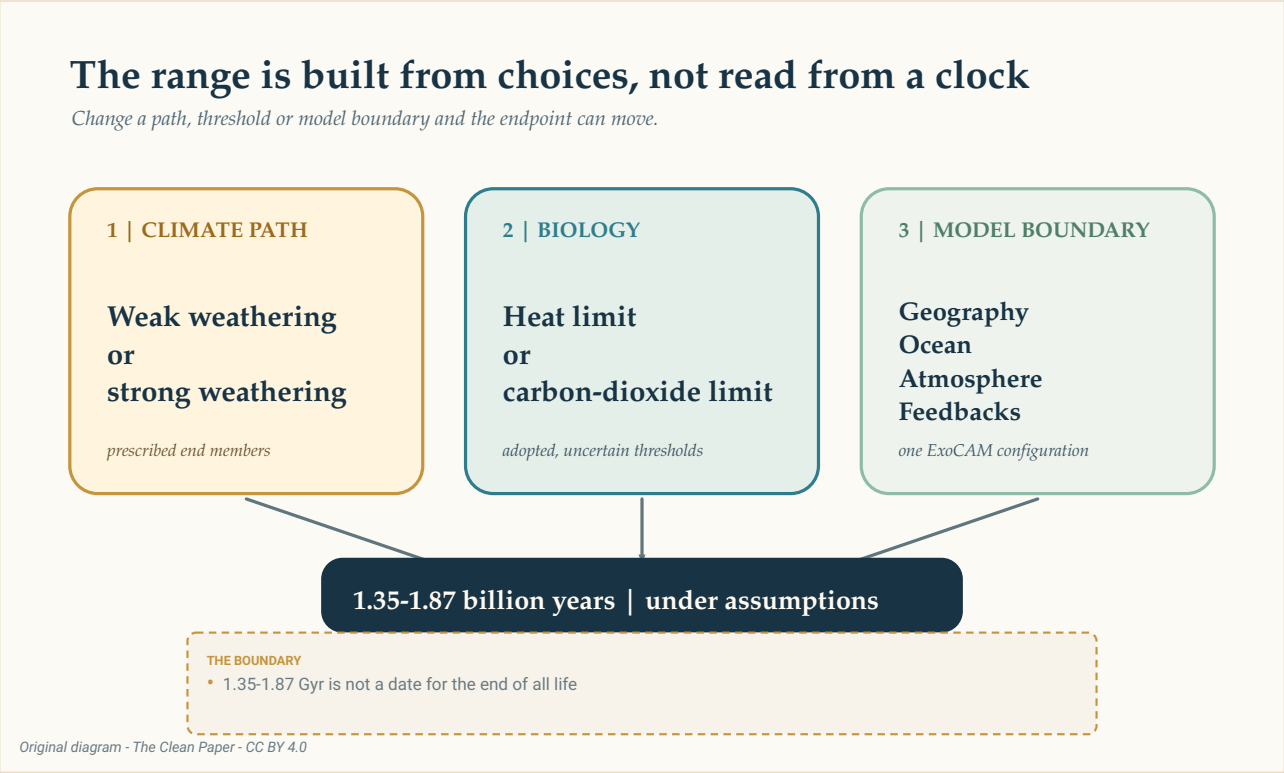
Վերջին թիվը ամենամեծ կենսաբանական զգուշացումն ունի: Հեղինակները մեկ ppm սահմանը բացահայտ անվանում են նախնական: Այն ապագա Երկրի պայմաններում բոլոր CAM բույսերի կամ ջրային բուսականության համար փորձարարորեն հաստատված գոյատևման շեմ չէ:

> **C3-ը, C4-ը և CAM-ը ռազմավարություններ են, ոչ սանդուղք**
>
> Բույսերը ածխածին բռնելու համար տարբեր կենսաքիմիական ուղիներ են օգտագործում: **C3 ֆոտոսինթեզը** ամենատարածվածն է: **C4 ֆոտոսինթեզը**, որն օգտագործում են, օրինակ, եգիպտացորենն ու շաքարեղեգը, CO_2-ը կենտրոնացնում է ածխածին ֆիքսող ֆերմենտի շուրջ և կարող է ավելի լավ աշխատել, երբ CO_2-ը քիչ է: **Crassulacean acid նյութափոխանակությունը (CAM)** ածխածնի ներծծումն ու օգտագործումը բաժանում է գիշերվա և ցերեկվա միջև՝ շատ բույսերի օգնելով ջուր խնայել: Սրանք բազմաթիվ տեսակային տարբերություններով ռազմավարությունների ընտանիքներ են, ոչ «ավելի լավ» բույսերի հաջորդական աստիճաններ: Հոդվածի շատ ցածր CO_2 շեմերը հնարավոր սահմաններ ուսումնասիրելու ենթադրություններ են, ոչ երաշխիք, որ ապագա էկոհամակարգը կէվոլյուցիոնանա դրանք օգտագործելու համար:

Ինչու 1.86 միլիարդ տարին «պիտանելիության ժամկետ» չէ

Հոդվածի հաճախ մեջբերվող մոտ **1.86 միլիարդ տարի** գնահատականը երկու լավատեսական վերին վերջնակետերի միջինն է՝ 1.84 միլիարդ տարի CO_2-ով սահմանափակված ճյուղում և 1.87 միլիարդ տարի ջերմությամբ սահմանափակված ճյուղում: Սա երկու տարբեր սցենարների կոմպակտ ամփոփում է: Դա ավելի բարձր ճշգրտությամբ երրորդ մոդելային արդյունք չէ և «լավագույն գնահատական» ամսաթիվ չէ:

Նույնիսկ ավելի լայն՝ 1.35–1.87 միլիարդ տարվա միջակայքը մեկ ընդհանուր հավանականություն չունի: Ստորին և վերին արժեքները կախված են հողմահարման տարբեր ենթադրություններից, տարբեր կենսաբանական շեմերից և կլիմայական մոդելի մեկ կոնֆիգուրացիայից: Միջակայքը նույնքան չափում է փորձի ընտրությունները, որքան ժամանակը:



1.35–1.87 միլիարդ տարվա միջակայքը առաջանում է միայն հողմահարման ուղի, կենսաբանական շեմ և մոդելային սահման ընտրելուց հետո: Սա ենթադրությունների քարտեզ է, ոչ ժամացույց, որն ավարտվում է ամբողջ կյանքի ոչնչացմամբ:

The Clean Paper CC BY 4.0

Այլ սահմաններ կարող են առաջինը հասնել

Բուսական կենսոլորտի ամենաերկար գնահատականները մոտենում են մեկ այլ, նույնպես անորոշ սահմանին՝ խոնավ կամ runaway greenhouse վիճակին, որը կարող է մեծ օվկիանոսային կորուստ առաջացնել: Կլիմայական մոդելները զգալիորեն տարաձայնվում են, թե աճող արևային հոսքի պայմաններում երբ են սկսվում այդ վիճակները, հատկապես ներկա պայմաններից շատ հեռու: Որոշ գնահատականներ դրանք դնում են ամենալավատեսական ֆոտոսինթեզային սահմանից առաջ:

Սա նշանակում է, որ վերին ճյուղը չի կարելի կարդալ որպես խոստում, թե Երկիրը մինչև այսօրվանից 1.87 միլիարդ տարի հետո կպահպանի իր օվկիանոսները, մեզ ծանոթ մայրցամաքները կամ բնակելի մակերևութային պայմանները: Մոդելը նաև չի

ներառում ապագայի սալային տեկտոնիկան, ցամաքի տարածքի փոփոխությունները, զարգացող էկոհամակարգերը կամ ամբողջական դինամիկ օվկիանոսը: Մթնոլորտի էներգիա կլանելու և ճառագայթելու հաշվարկները նույնպես մղվում են ուժեղ արևային հոսքի և չափազանց ցածր CO2-ի ռեժիմների մեջ, որտեղ տարբեր մոդելներ իրարից շեղվում են:

Էվոյյուցիոն հարմարվողականությունն ու տեխնոլոգիական միջամտությունը հոդվածի քննարկման մեջ հայտնվում են որպես հնարավորություններ: Դրանք 29 կլիմայական սիմուլյացիաների ելքեր չեն: Մոդելը չի ցույց տալիս, որ ապագա օրգանիզմները զարգացնում են մեկ ppm CO2-ում աշխատող ֆոտոսինթեզային ուղի, և չի ցույց տալիս մեկ միլիարդ տարի մթնոլորտը կառավարող քաղաքակրթություն:

Սա այսօրվա կլիմայական ճգնաժամի մասին արդյունք չէ

Արեգակի պայծառացումը գործում է հարյուր միլիոնավորից միլիարդավոր տարիների ընթացքում: Ժամանակակից մարդածին տաքացումը գալիս է տասնամյակների և դարերի ընթացքում ջերմոցային գազերի արագ աճից: Սրանք տարբեր forcing-ներ են՝ արմատապես տարբեր ժամանակային մասշտաբներով, և պատասխանում են տարբեր հարցերի:

Այս ուսումնասիրության մեջ ոչինչ չի թուլացնում ներկա կլիմայական փոփոխության ապացույցները և չի հիմնավորում գործողությունը հետաձգելը: Կենսոլորտը, որը հեռավոր մոդելային սցենարներից մեկում կարող է պահպանել ֆոտոսինթեզող կյանքի որոշ մասը, նույնը չէ, ինչ կլիման, որտեղ այսօրվա հասարակություններն ու էկոհամակարգերը անվտանգ են:

Հոդվածի արժեքը այն է, որ շատ հեռավոր հարցը դարձնում է ավելի կարգապահ: Այն ցույց է տալիս, որ ավելի վաղ, պարզ մոդելները կարող էին չափազանց ուժեղ տաքացնել մոլորակը, երբ արևային հոսքը բարձրացվում էր, բայց CO2-ը մնում էր ֆիքսված, և որ ֆոտոսինթեզող կյանքը կարող է պահպանման ավելի շատ ուղիներ ունենալ, քան առաջարկում է ածխածնի մեկ կանոնական շեմը: Միաժամանակ այն ցույց է տալիս, թե ինչու յուրաքանչյուր լրացուցիչ միլիարդ տարվա մասնաբաժնի հետևում ենթադրությունների շղթա կա:

Տերևը սնուցող Արեգակը դանդաղ փոխվում է: Երկիրը ևս 1.35, 1.87 կամ մեկ այլ թվով միլիարդ տարի կանաչ կմնա՞՝ կախված կլինի նրանից, թե ապարները, ջուրը, մթնոլորտն ու կյանքը ինչպես կարձագանքեն միասին: Ազնիվ արդյունքը ամսաթիվ չէ: Դա պայմանագրի ավելի լայն տեսարան է:

Կարճ ամփոփում

Եռաչափ կլիմայական ուսումնասիրությունը հարցնում է, թե որքան երկար կարող է պահպանվել Երկրի բուսական՝ ֆոտոսինթեզային կենսոլորտը, երբ Արեգակը դանդաղ պայծառանում է: Հետազոտողները հաշվարկել են 29 առանձին կայուն վիճակի կլիմա և դրանց միջով անցկացրել երկու ցուցադրական ծայրային սցենարներ: Թույլ հողմահարման և 400 ppm-ի վրա ֆիքսված CO2-ի դեպքում ցամաքային բույսերի ընդունված ջերմային սահմանները հասնում են մոտ 1.68 և 1.87 միլիարդ տարի հետո: Ուժեղ հողմահարման և 288 կելվինի՝ մոտ 15 °C գլոբալ միջինի դեպքում ֆոտոսինթեզի ընդունված CO2 սահմանները հասնում են մոտ 1.35, 1.64 և, նախնական շեմ օգտագործելիս, 1.84 միլիարդ տարի հետո: Հաճախ մեջբերվող 1.86 միլիարդ տարին պարզապես երկու լավատեսական վերին վերջնակետերի կլորացված միջինն է: Սրանք սցենարից կախված մոդելային միջակայքներ են, ոչ ամսաթիվ, երբ կվերջանան Երկիրը, մարդկությունը կամ ամբողջ կյանքը: Մոդելը օգտագործում է նախապես սահմանված ուղիներ, ներկա աշխարհագրություն, slab ocean և չունի բացահայտ հող–բուսականություն կամ կլիմա–հողմահարում դինամիկ կապ, իսկ ամենաերկար գնահատականները մոտենում են անորոշ ջերմոցային և օվկիանոսի կորստի սահմաններին:

Առանց չափազանցության

Ինչ է ցույց տալիս հոդվածը. ExoCAM-ի այս կոնֆիգուրացիայում եռաչափ կլիմաները ընդհանուր առմամբ ավելի քիչ են տաքանում արևային հոսքի աճի և ֆիքսված CO2-ի պայմաններում, քան համեմատության համար օգտագործված պարզեցված մոդելները: Հողմահարման երկու սահմանված ծայրային սցենարների և մի քանի ընդունված կենսաբանական շեմերի դեպքում բուսական կենսոլորտի սահմանները ընկնում են այսօրվանից մոտ 1.35–1.87 միլիարդ տարի հետո:

Ինչն է հավանական, բայց հաստատված չէ. Որ որոշ CAM բույսեր կամ լուծված բիկարբոնատ օգտագործող ջրային բույսեր կարող են պահպանել ֆոտոսինթեզը մոտ մեկ ppm մթնոլորտային CO2-ի դեպքում, որ հարմարվողականությունը կամ տեխնոլոգիան կարող են ավելի երկարացնել ֆոտոսինթեզային կյանքը, և որ իրական կլիմա–հողմահարում ուղին կմնա երկու մոդելային ծայրային անդամների միջև:

Ինչ չի ցույց տալիս. Բոլոր բույսերի, ամբողջ կյանքի, մարդկային քաղաքակրթության, Երկրի օվկիանոսների կամ մոլորակի վերջի ֆիքսված ամսաթիվ, հաջորդ երկու միլիարդ տարվա մեկ անընդհատ սիմուլյացիա կամ այսօրվա մարդածին կլիմայական փոփոխությունը թերագնահատելու որևէ պատճառ:

Հիմնական սահմանափակումները. Մեկ կլիմայական մոդելի ընտանիքի 29 կայուն վիճակի դեպքեր, դինամիկորեն կապվածի փոխարեն նախապես սահմանված հողմահարման ուղիներ, ներկա աշխարհագրություն, slab ocean, ֆիքսված մեթան,

զրո օբլիկվիտետ և էքսցենտրիսիտետ, հողի, բուսականության կամ կենսոլորտային հետադարձ կապի բացակայություն, անորոշ ջերմային ու CO2 շեմեր և խոնավ ու runaway greenhouse պայմանների մոտ մոդելների մեծ տարաձայնություն:

Որքան վստահություն պետք է ունենա սովորական ընթերցողը. Բարձր վստահություն, որ ուսումնասիրությունը լայնացնում է հավանական մոդելային միջակայքը և հստակեցնում այն վերահսկող ենթադրությունները: Միջին վստահություն թվային միջակայքի նկատմամբ՝ որպես այս մոդելի ներսում օգտակար շրջանակ: Ցածր վստահություն որևէ ճշգրիտ ամսաթվի նկատմամբ, քանի որ ամենահեռավոր վերջնակետերը կախված են դիտավորյալ ծայրահեղ կլիմայական ուղիներից և անորոշ կենսաբանությունից:

Աղբյուրներ

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