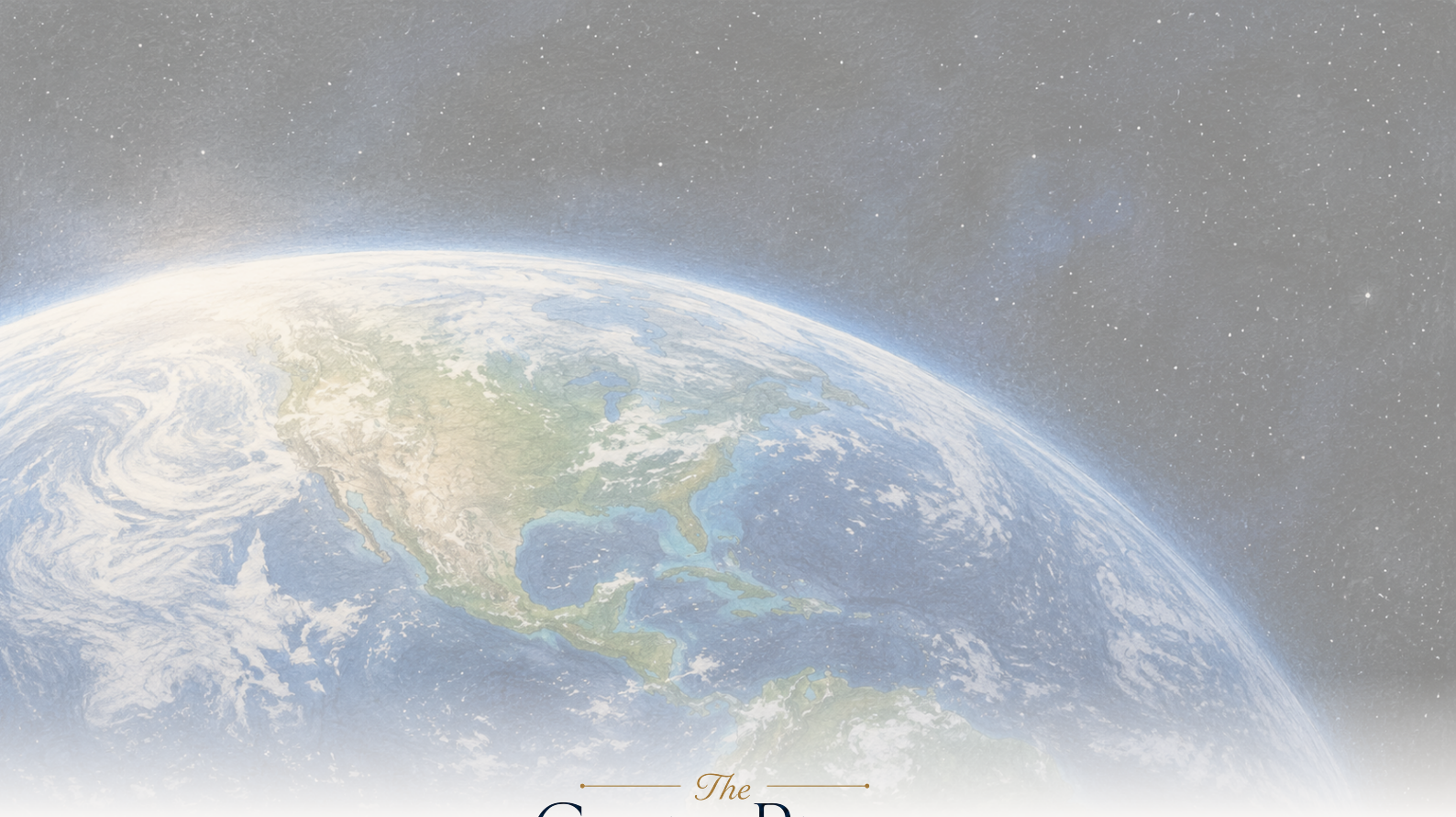


The Clean Paper

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

რამდენ ხანს შეიძლება დარჩეს დედამიწა მწვანე? კლიმატური მოდელი გვაძლევს დიაპაზონებს და არა განკითხვის დღის თარიღს

ოცდაცხრა სამგანზომილებიანი კლიმატური სიმულაცია დედამიწის ფოტოსინთეზური ბიოსფეროს სხვადასხვა საზღვარს დაახლოებით 1.35-დან 1.87 მილიარდ წლამდე მომავალში ათავსებს. მნიშვნელობები დამოკიდებულია ქანების გამოფიტვის, სიცხისა და მცენარეებისთვის გამოსაყენებელი მინიმალური ნახშირორჟანგის შეგნებულად გამარტივებულ სცენარებზე. ისინი არ პროგნოზირებს, როდის დასრულდება ყველა მცენარე, მთელი სიცოცხლე, ცივილიზაცია ან პლანეტა.

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

რამდენ ხანს შეიძლება დარჩეს დედამიწა მწვანე? კლიმატური მოდელი გვაძლევს დიაპაზონ და არა განკითხვის დღის თარიღს

ფოთოლი ძალიან ვიწრო პირობებში ცხოვრობს. მას სჭირდება სინათლე, წყალი, ნახშირორჟანგი და ისეთი ტემპერატურა, რომელსაც მისი ბიოქიმია გაუძლებს. ადამიანის სიცოცხლის განმავლობაში მზე ამ პირობების თითქმის უცვლელ ნაწილად გვეჩვენება. მილიარდი წლის მასშტაბზე ასე აღარ არის.

მთავარ მიმდევრობაზე დაბერებისას მზე ნელ-ნელა უფრო კაშკაშა ხდება. მეტი მზის ენერგია დედამიწას ათბობს, მაგრამ პლანეტას ხანგრძლივი პასუხიც აქვს: წვიმის წყალს, ნახშირორჟანგსა და სილიკატურ ქანებს შორის რეაქციებს ატმოსფეროდან CO2-ის მოცილება შეუძლია. ეს სათბურის ეფექტს ასუსტებს და გათბობის ნაწილს აბალანსებს. თუმცა იგივე მექანიზმი, რომელიც პლანეტას აგრილებს, საბოლოოდ ფოტოსინთეზურ ორგანიზმებს შეიძლება იმ ნახშირბადს ართმევდეს, რომლითაც ცოცხალ ქსოვილს აშენებენ.

Journal of Geophysical Research: Atmospheres-ში გამოქვეყნებული ახალი ნაშრომი კითხულობს, რომელი ზღვარი შეიძლება დადგეს პირველი: ზედმეტი სიცხე თუ ძალიან ცოტა ნახშირორჟანგი. პასუხი დედამიწის „სიკვდილის თარიღი“ არაა. ორი შეგნებულად გამარტივებული სამომავლო გზის ფარგლებში, ფოტოსინთეზური სიცოცხლისთვის მიღებული ზღვრები დაახლოებით **1.35-დან 1.87 მილიარდ წლამდე მომავალში** მოდის.

ეს დიაპაზონი ეხება **ვეგეტაციურ ბიოსფეროს** — დედამიწის ცოცხალი სისტემის იმ ნაწილს, რომელსაც ფოტოსინთეზური ორგანიზმები ინარჩუნებს, განსაკუთრებით მცენარეები და სხვა სიცოცხლე, რომელიც სინათლესა და ნახშირორჟანგს ბიოლოგიურ მასალად გარდაქმნის. ეს არ არის ყველა მიკრობის პროგნოზი. არც ადამიანური ცივილიზაციის სიცოცხლის ხანგრძლივობაა. და არც პლანეტის სიცოცხლის ხანგრძლივობა.

პლანეტურ „თერმოსტატს“ ორი გაურკვეველი პარამეტრი აქვს

ცენტრალური გაურკვევლობა **სილიკატების გამოფიტვაა**. ნახშირორჟანგი წვიმის წყალში იხსნება, სილიკატურ ქანებთან რეაგირებს და საბოლოოდ ოკეანეებსა და ნალექებში ხვდება. ვულკანები გეოლოგიურ დროით მასშტაბებზე ნახშირორჟანგს კვლავ ატმოსფეროში აბრუნებს. ეს პროცესები ერთად კარბონატ-სილიკატური ციკლის ნაწილს ქმნის, რომელსაც ხშირად პლანეტურ თერმოსტატს უწოდებენ.

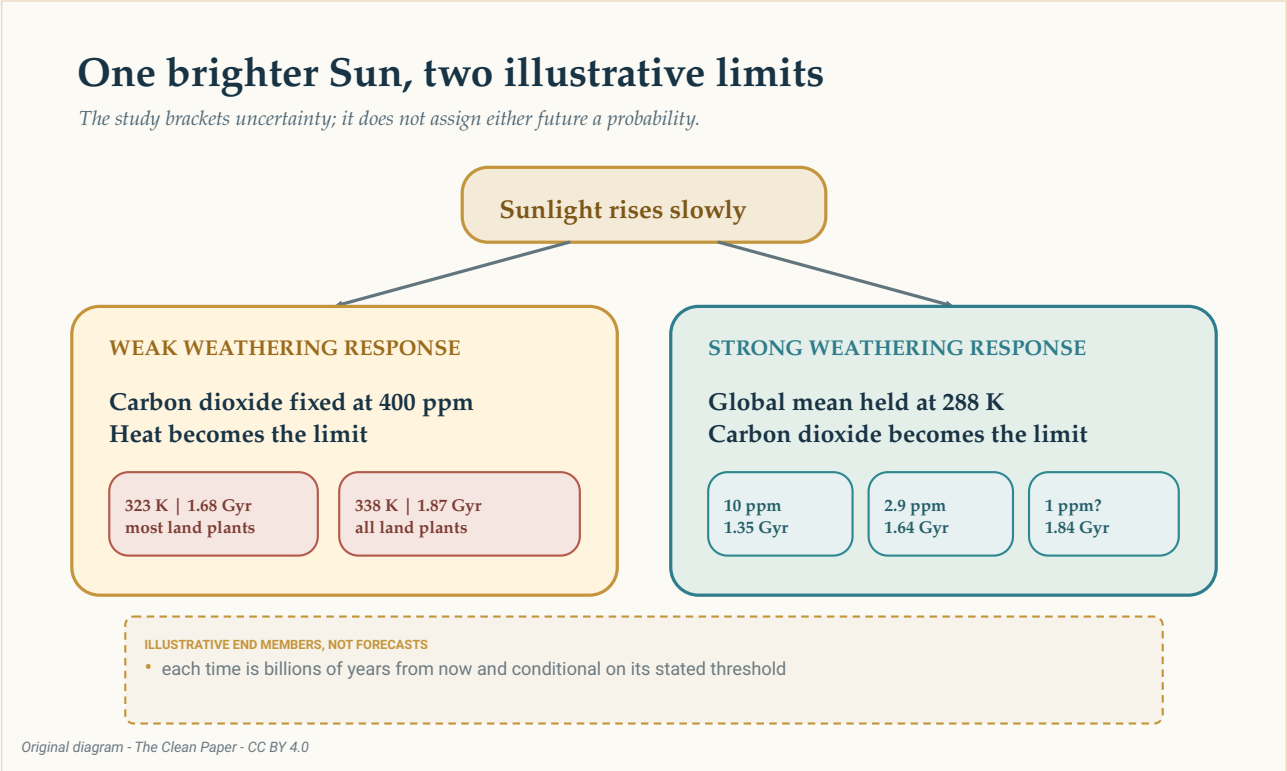
უფრო თბილ და ნოტიო სამყაროში გამოფიტვა შეიძლება დაჩქარდეს და ნახშირორჟანგი უფრო სწრაფად მოაშოროს ატმოსფეროს. მაგრამ მეცნიერებმა არ იციან, რამდენად

ძლიერად იმოქმედებს ეს პასუხი მომავლის უფრო კაშკაშა მზის პირობებში. ამიტომ Jacob Haqq-Misra-მ და Eric Wolf-მა ერთი თითქოს „სწორი“ გზა არ აირჩიეს. მათ მოდელირება გაუკეთეს ორ **საზღვრულ შემთხვევას** — განზრახ უკიდურეს სცენარებს, რომლებიც გაურკვევლობის ფარგლებს ავლებს.

- **სუსტი გამოფიტვის საზღვრულ შემთხვევაში** ატმოსფერული ნახშირორჟანგი 400 ნაწილები per million-ზე რჩება, ხოლო მზის გაძლიერებული გამოსხივება ტემპერატურას ზრდის.
- **ძლიერი გამოფიტვის საზღვრულ შემთხვევაში** გლობალური საშუალო ზედაპირული ტემპერატურა 288 kelvin-ზე, ანუ დაახლოებით 15 გრადუს ცელსიუსზე რჩება, ხოლო მზის გამოსხივების ზრდასთან ერთად ატმოსფერული ნახშირორჟანგი მცირდება.

არც ერთი განშტოება დედამიწის რეალურ მომავალად არ არის წარმოდგენილი. პირველი კითხულობს, რას გააკეთებდა სიცხე, თუ CO2 მაღალი დარჩებოდა. მეორე კი — რას გააკეთებდა ნახშირბადის დეფიციტი, თუ გამოფიტვა გლობალურ ტემპერატურას დღევანდელ საშუალოსთან ახლოს შეინარჩუნებდა.

> **როგორ შეიძლება გამოფიტვა თერმოსტატივით მოქმედებდეს?**
>
> ეს შედარება უკუკავშირს ეხება და არა ნამდვილ მარეგულირებელ სახელურს. თუ უფრო თბილი კლიმატი ქიმიურ გამოფიტვას აჩქარებს, ატმოსფერული ნახშირორჟანგის უფრო დიდი ნაწილი შეიძლება გახსნილ ნივთიერებებში, მინერალებსა და ნალექებში აღმოჩნდეს. ამ სათბურის აირის მოცილება საწყისი გათბობის ნაწილს ეწინააღმდეგება. ძალიან ხანგრძლივ მასშტაბებზე ვულკანური დეგაზაცია CO2-ს უკან აბრუნებს.
> თითოეული რგოლის სიძლიერე დამოკიდებულია ნალექზე, გაშიშვლებულ ქანებზე, ეროზიაზე, ბიოლოგიაზე, ტექტონიკასა და ოკეანის ქიმიაზე. ამიტომ ნაშრომი ამოწმებს საზღვრულ რეაქციებს და თერმოსტატს ცნობილი მექანიზმივით არ ეპყრობა.



ნაშრომი გაურკვეველ მომავალს ორი საილუსტრაციო საზღვრული შემთხვევით შემოსაზღვრავს. თუ გამოფიტვა სუსტად რეაგირებს, მზარდი სიცხე ხმელეთის მცენარეებისთვის მიღებულ ზღვრებს აღწევს. თუ ძლიერად რეაგირებს, კლებადი ნახშირორჟანგი ფოტოსინთეზისთვის მიღებულ ზღვრებს აღწევს. ეს პირობითი მოდელური განშტოებებია და არა ალბათობები ან უკუთვლის თარიღები.

The Clean Paper CC BY 4.0

ოცდაცხრა დამყარებული მოდელური სამყარო და არა ერთი ორმილიარდწლიანი ფილმი

მკვლევრებმა გამოიყენეს ExoCAM, სამგანზომილებიანი გლობალური კლიმატური მოდელი, და გამოთვალეს **29 სტაციონარული კლიმატი** მზის უფრო ძლიერი გამოსხივებისა და ნაკლები ნახშირორჟანგის სხვადასხვა კომბინაციისთვის. თითოეული შემთხვევა 70 მოდელური წელი მუშაობდა. აქ ერთი მოდელური წელი ფიქსირებულ პირობებში სიმულირებული ერთწლიანი ციკლია: ეს არის გამოთვლითი დრო, რომელიც ხელოვნურ კლიმატს დამყარების საშუალებას აძლევს და არა დედამიწის მომავლის წლიდან წლამდე პროგნოზის ერთი ნაბიჯი. კლიმატის დამყარების შემდეგ ბოლო 20 წელი დაასაშუალოეს.

ეს 29 შემთხვევა ცალკე მოდელური სამყაროა. თითოეული გაშვება ბადის ერთი წერტილია და პასუხობს კითხვას: „რომელი დამყარებული კლიმატი შეესაბამება მზის გამოსხივებისა და CO2-ის ამ არჩეულ წყვილს?“ კომპიუტერს არ აუღია დღევანდელი დედამიწა და არ გაუშვია მისი ატმოსფერო, ქანები, ოკეანეები და სიცოცხლე უწყვეტად

მომდევნო ორი მილიარდი წლის განმავლობაში. ამის ნაცვლად ავტორებმა წინასწარ გამოთვლილ წერტილებში ორი სქემატური გამოფიტვის გზა გაატარეს; წერტილებს შორის თავად გზა არ ყოფილა სიმულირებული.

ცხრილი იმეორებს მზის გამოსხივებისა და ნახშირორჟანგის კომბინაციებს ოფიციალური მოდელის მონაცემთა არქივიდან. შემთხვევების ID-ები აქ მხოლოდ წაკითხვის გასაადვილებლადაა დამატებული არქივის რიგითობით. **S/S0** არის ფარდობითი მზის მუდმივა: მოდელში გამოყენებული შემომავალი მზის ენერგია გაყოფილი მის დღევანდელ მნიშვნელობაზე, S0-ზე. შესაბამისად, 1.2 ნიშნავს დღევანდელზე 20 პროცენტით მეტ შემომავალ მზის ენერგიას. **CO2 (ppm)** არის ატმოსფერული ნახშირორჟანგის შერევის ფარდობა — CO2-ის მოლეკულების რაოდენობა მილიონ ატმოსფერულ მოლეკულაზე.

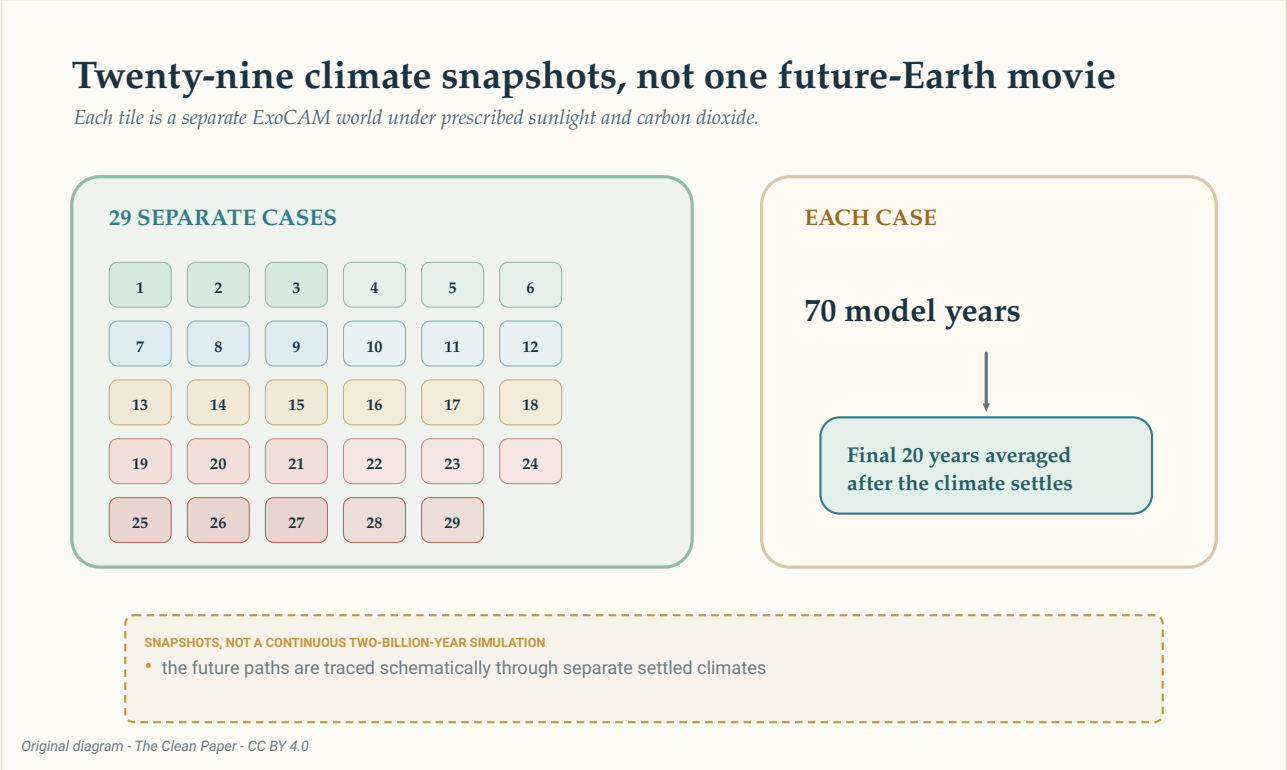
შემთხვევის ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143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

მოდელური დედამიწა ნაცნობია, მაგრამ განზრახ შეზღუდული. მას დედამიწის ზომა

და დღევანდელი გეოგრაფია აქვს. სრულად ცირკულირებადი ოკეანის ნაცვლად გამოყენებულია გამარტივებული slab ocean, ატმოსფერული წნევა დაახლოებით დღევანდელი დედამიწის დონეზე — ერთი bar — და მეთანი ფიქსირებულია. ორბიტა იდეალურად წრიულია, ანუ ექსცენტრისიტეტი ნულია, ხოლო ბრუნვის ღერძს დახრილობა არ აქვს, ანუ obliquity ნულია. მოდელში პირდაპირ არ არის წარმოდგენილი ნიადაგი, მცენარეულობა ან ცვალებადი ბიოსფეროს უკუკავშირი. ყველაზე მნიშვნელოვანია, რომ კლიმატური მოდელი დინამიკურად არ არის დაკავშირებული ქანების გამოფიტვის მოდელთან. სხვა სიტყვებით, ExoCAM თავად არ ითვლის გამოფიტვას, შემდეგ მის მიხედვით არ აახლებს CO2-ს და უკუკავშირის ციკლში შემდეგ კლიმატს არ უშვებს. მკვლევრებმა წინასწარ განსაზღვრეს ორი საზღვრული გზა და ისინი 29-შემთხვევიან კლიმატურ ბადეში გაატარეს.

რას ნიშნავს „სტაციონარული მდგომარეობა“ კლიმატურ მოდელში?

სტაციონარული შემთხვევა არის მოდელური კლიმატი, რომელსაც ერთი არჩეული მზისა და ატმოსფეროს პირობებში დამყარების საშუალება მისცეს. სიმულაციაში ამინდი კვლავ იცვლება დღიდან დღემდე და წლიდან წლამდე, მაგრამ მისი ხანგრძლივი საშუალო მნიშვნელობები აღარ იხრება ძლიერად ერთ მიმართულებაში.
ეს სასარგებლოა კითხვაზე „რა კლიმატი შეესაბამება ამ პირობებს?“ პასუხისთვის. ეს განსხვავდება იმის ზუსტი პროგნოზისგან, თუ როგორ გადავა რეალური დედამიწა ერთი პირობებიდან მეორეში.



თითოეული ფილა ExoCAM-ის ცალკე კლიმატური გაშვებაა 70 მოდელური წლის

განმავლობაში, საიდანაც ბოლო 20 წელი დასაშუალოებულია. კვლევამ 29 დამყარებული კლიმატი შეარჩია წინასწარ განსაზღვრული მზის გამოსხივებისა და CO2-ის პირობებში; მას არ დაუსიმულირებია ერთი უწყვეტად განვითარებადი დედამიწა ორი მილიარდი წლის განმავლობაში.

The Clean Paper CC BY 4.0

პირველი საზღვრული შემთხვევა: CO2 საკმარისია სიცხე — ზედმეტი

სუსტი გამოფიტვის განშტოებაში CO2 ფიქსირებულად 400 ნაწილები per million-ზე რჩება. მზის ენერგიის ზრდასთან ერთად შემზღუდველ ფაქტორად სიცხე იქცევა.

ნაშრომი წინა კვლევებიდან აღებულ ორ გლობალურ საშუალო ტემპერატურულ ზღვარს იყენებს:

- **323 kelvin-ზე**, ანუ გლობალურ წლიურ საშუალოდ დაახლოებით **50 გრადუს ცელსიუსზე**, სამყარო ხმელეთის მცენარეების უმეტესობისთვის ზედმეტად ცხელად ითვლება. მოდელი ამ ზღვარს დაახლოებით **1.68 მილიარდ წელიწადში** აღწევს.
- **338 kelvin-ზე**, ანუ გლობალურ წლიურ საშუალოდ დაახლოებით **65 გრადუს ცელსიუსზე**, სამყარო ხმელეთის ყველა მცენარისთვის ზედმეტად ცხელად ითვლება. მოდელი ამ ზღვარს დაახლოებით **1.87 მილიარდ წელიწადში** აღწევს.

ეს მიღებული ბიოლოგიური ზღვრებია და არა უნივერსალური ტემპერატურები, რომლებზეც ყველა ფოტოსინთეზური ორგანიზმი აუცილებლად მარცხდება. გლობალური საშუალო ასევე დიდ რეგიონულ განსხვავებებს მალავს. კვლევა ცალკე ამოწმებს, სად შეიძლება ტემპერატურისა და წყლის შესაფერისი კომბინაციები დარჩეს, თუმცა კლიმატურ რუკაზე ერთი იარლიყი ყველა შესაძლო მომავალ თავშესაფარსა თუ ადაპტაციას ვერ აღწერს.

მეორე საზღვრული შემთხვევა: ტემპერატურა მისაღებია, CO2 — ძალიან ცოტა

ძლიერი გამოფიტვის განშტოებაში გლობალური საშუალო ტემპერატურა 288 kelvin-ზე, დაახლოებით 15 გრადუს ცელსიუსზე, ფიქსირდება, ხოლო ატმოსფერული CO2 მცირდება. აქ პასუხი დამოკიდებულია იმაზე, რამდენად ცოტა ნახშირბადის გამოყენება შეუძლია სხვადასხვა ფოტოსინთეზურ გზას.

- ტრადიციულ **10 ნაწილები per მილიონი** ზღვარზე — მილიონ ატმოსფერულ მოლეკულაზე 10 ნახშირორჟანგის მოლეკულა — C4 ფოტოსინთეზის ზღვარი

დაახლოებით **1.35 მილიარდ წელიწადში** დგება. C4 ფოტოსინთეზს იყენებს, მათ შორის, სიმინდი და შაქრის ლერწამი; ის CO2-ს იმ ფერმენტის ირგვლივ აკონცენტრირებს, რომელიც ნახშირბადს აფიქსირებს.
- წინა სამუშაოებში განხილული ალტერნატიული **2.9 ნაწილები per მილიონი** C4 ზღვარი ამ დროს დაახლოებით **1.64 მილიარდ წლამდე** სწევს.
- საცდელი **1 part per მილიონი** ზღვარი, რომელიც შეიძლება უკავშირდებოდეს ზოგი CAM მცენარის — ანუ crassulacean acid metabolism-ის მომხმარებელი მცენარეების, რომლებიც CO2-ის ღამით მიღებას მის დღისით გამოყენებისგან დროით აცალკევებს — ან გახსნილი ბიკარბონატის გამოყენების უნარის მქონე წყლის მცენარეების გამძლეობას, დროს დაახლოებით **1.84 მილიარდ წლამდე** სწევს.

ბოლო რიცხვს ყველაზე დიდი ბიოლოგიური შენიშვნა ახლავს. ავტორები ერთ part per მილიონი ზღვარს პირდაპირ საცდელს უწოდებენ. ის არ არის ექსპერიმენტულად დადგენილი გადარჩენის ზღვარი ყველა CAM მცენარისა თუ წყლის მცენარეულობისთვის მომავლის დედამიწის პირობებში.

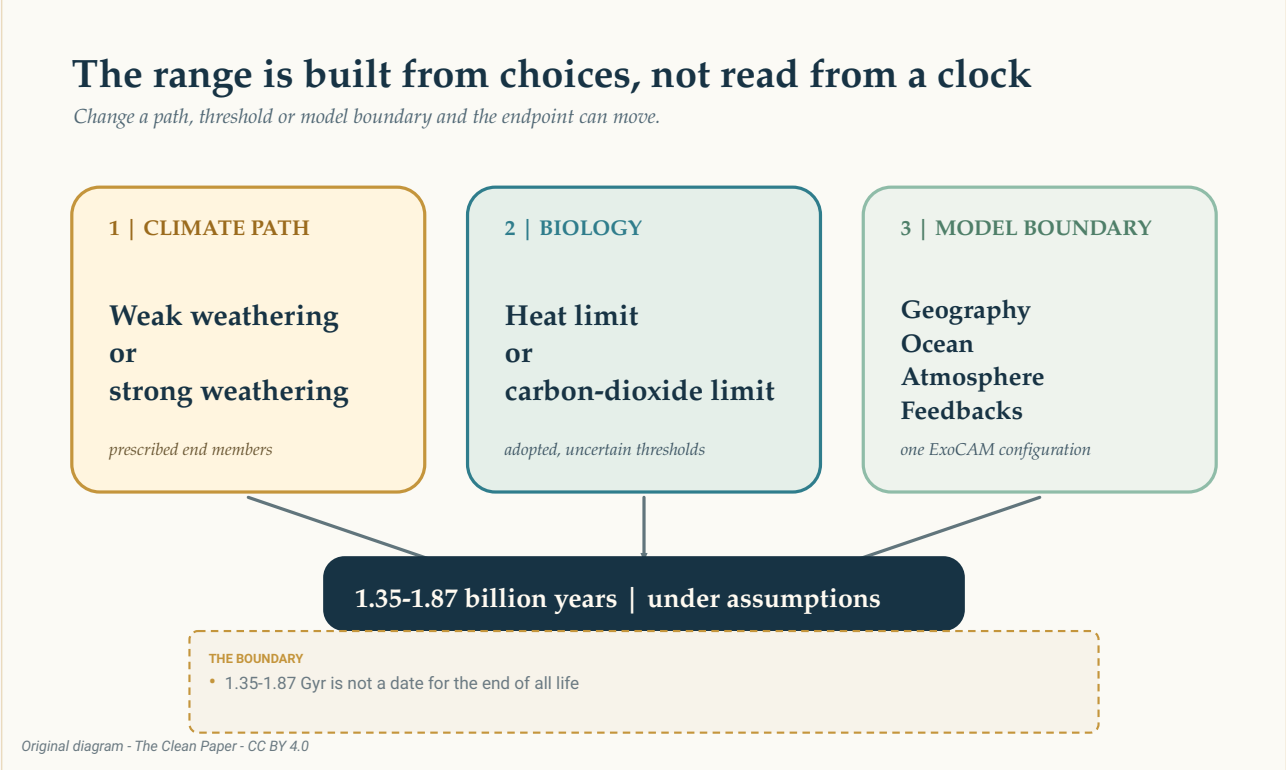
> **C3, C4 და CAM სტრატეგიებია და არა საფეხურები**
>
> მცენარეები ნახშირბადის დასაჭერად სხვადასხვა ბიოქიმიურ გზას იყენებს. **C3 ფოტოსინთეზი** ყველაზე გავრცელებულია. **C4 ფოტოსინთეზი**, რომელსაც იყენებს, მათ შორის, სიმინდი და შაქრის ლერწამი, ნახშირორჟანგს ნახშირბადის დამაფიქსირებელი ფერმენტის ირგვლივ აკონცენტრირებს და დაბალი CO2-ის პირობებში უკეთ შეიძლება მუშაობდეს. **Crassulacean acid მეტაბოლიზმი (CAM)** ნახშირბადის მიღებასა და გამოყენებას ღამესა და დღეს შორის აცალკევებს, რაც ბევრ მცენარეს წყლის დაზოგვაში ეხმარება.
> ეს სხვადასხვა სტრატეგიის ოჯახებია მრავალი სახეობრივი განსხვავებით და არა „უკეთესი“ მცენარეების თანმიმდევრული საფეხურები. ნაშრომში გამოყენებული ძალიან დაბალი CO2-ის ზღვრები შესაძლო საზღვრების გამოსაკვლევი დაშვებებია და არა გარანტია, რომ მომავლის ეკოსისტემა მათ გამოყენებას ევოლუციურად შეძლებს.

რატომ არ არის 1.86 მილიარდი წელი „ვარგისიანო ვადა“

ნაშრომის ხშირად ციტირებული დაახლოებით **1.86 მილიარდი წელი** ორი ოპტიმისტური ზედა წერტილის საშუალოა: 1.84 მილიარდი წელი CO2-ით შეზღუდულ განშტოებაში და 1.87 მილიარდი წელი სიცხით შეზღუდულში. ეს ორი განსხვავებული სცენარის მოკლე შეჯამებაა. ის არ არის მესამე, უფრო ზუსტი მოდელური შედეგი და არც საუკეთესო შეფასების თარიღი.

უფრო ფართო 1.35–1.87 მილიარდი წლის დიაპაზონსაც ერთი ალბათობა არ ახლავს.

მისი ქვედა და ზედა მნიშვნელობები სხვადასხვა გამოფიტვის დაშვებაზე, სხვადასხვა ბიოლოგიურ ზღვარზე და ერთი კლიმატური მოდელის კონფიგურაციაზეა დამოკიდებული. დიაპაზონი იმდენადვე ასახავს ექსპერიმენტში არჩეულ ვარიანტებს, რამდენადაც დროს.



1.35–1.87 მილიარდი წლის დიაპაზონი მხოლოდ მას შემდეგ ჩნდება, რაც არჩეულია გამოფიტვის გზა, ბიოლოგიური ზღვარი და მოდელის საზღვარი. ეს დაშვებების რუკაა და არა საათი, რომელიც მთელი სიცოცხლის გადაშენებამდე ითვლის.

The Clean Paper CC BY 4.0

სხვა ზღვრები შეიძლება უფრო ადრე დადგეს

ვეგეტაციური ბიოსფეროს ყველაზე ხანგრძლივი შეფასებები სხვა, ასევე გაურკვეველ საზღვარს უახლოვდება: ნოტიო ან runaway greenhouse მდგომარეობას, რომელმაც შესაძლოა ოკეანეების დიდი ნაწილის დაკარგვა გამოიწვიოს. კლიმატური მოდელები მნიშვნელოვნად ვერ თანხმდება, მზის გამოსხივების ზრდისას როდის იწყება ეს მდგომარეობები, განსაკუთრებით დღევანდელი პირობებიდან შორს. ზოგი შეფასება მათ ყველაზე ოპტიმისტურ ფოტოსინთეზურ ზღვარზე ადრე ათავსებს.

ამიტომ ზედა განშტოება ვერ წავიკითხავთ როგორც დაპირებას, რომ დედამიწა ოკეანეებს, ნაცნობ კონტინენტებს ან საცხოვრებელ ზედაპირულ პირობებს 1.87 მილიარდი წლის განმავლობაში აუცილებლად შეინარჩუნებს. მოდელი არც მომავლის ფირფიტების ტექტონიკას, ხმელეთის ფართობის ცვლილებას, განვითარებად ეკოსისტემებს

ან სრულად დინამიკურ ოკეანეს მოიცავს. ატმოსფეროს მიერ ენერგიის შთანთქმისა და გამოსხივების გამოთვლებიც გადადის ძალიან ძლიერი მზის გამოსხივებისა და უკიდურესად დაბალი CO2-ის რეჟიმებში, სადაც სხვადასხვა მოდელი ერთმანეთს მნიშვნელოვნად სცილდება.

ევოლუციური ადაპტაცია და ტექნოლოგიური ჩარევა ნაშრომის განხილვაში შესაძლებლობებად ჩნდება. ისინი 29 კლიმატური სიმულაციის შედეგები არაა. მოდელი არ აჩვენებს მომავლის ორგანიზმების მიერ ერთ part per million-ზე მოქმედი ფოტოსინთეზური გზის ევოლუციას და არც ცივილიზაციას, რომელიც ატმოსფეროს მილიარდი წლის განმავლობაში მართავს.

ეს შედეგი დღევანდელ კლიმატურ კრიზისზე არ არის

მზის გაძლიერება ასობით მილიონიდან მილიარდობით წლამდე მასშტაბზე მოქმედებს. თანამედროვე, ადამიანის მიერ გამოწვეული დათბობა კი სათბურის აირების სწრაფი ზრდით ხდება ათწლეულებსა და საუკუნეებში. ეს სხვადასხვა იძულებითი ფაქტორია, რადიკალურად განსხვავებულ დროით მასშტაბებზე და სხვადასხვა კითხვაზე პასუხობს.

ამ კვლევაში არაფერი ასუსტებს დღევანდელი კლიმატის ცვლილების მტკიცებულებებს და არც მოქმედების გადადებას ამართლებს. ბიოსფერო, რომელმაც შორეულ მოდელურ სცენარში შესაძლოა ფოტოსინთეზური სიცოცხლის ნაწილი შეინარჩუნოს, არ ნიშნავს კლიმატს, სადაც დღევანდელი საზოგადოებები და ეკოსისტემები უსაფრთხოდ იქნებიან.

ნაშრომი ღირებულია, რადგან ძალიან შორეულ კითხვას უფრო დისციპლინირებულს ხდის. ის აჩვენებს, რომ მზის გამოსხივების ზრდისას ფიქსირებული CO2-ის მქონე უფრო მარტივი მოდელები შესაძლოა ზედმეტად ათბობდა, და ფოტოსინთეზურ სიცოცხლეს შენარჩუნების მეტი შესაძლო გზა ჰქონდეს, ვიდრე ერთი კანონიკური ნახშირბადის ზღვარი გვთავაზობს. ასევე გვაჩვენებს, რატომ ახლავს ყოველი დამატებითი მილიარდი წლის წილი დაშვებების მთელი ჯაჭვი.

მზე, რომელიც ფოთოლს კვებავს, ნელ-ნელა იცვლება. დარჩება თუ არა დედამიწა მწვანე კიდევ 1.35, 1.87 თუ სხვა რაოდენობის მილიარდი წელი, დამოკიდებული იქნება ქანების, წყლის, ატმოსფეროსა და სიცოცხლის ერთობლივ პასუხზე. პატიოსანი შედეგი თარიღი არაა. ეს პირობების გაცილებით ფართო სურათია.

მოკლე შეჯამება

სამგანზომილებიანი კლიმატური კვლევა კითხულობს, რამდენ ხანს შეიძლება გაძლოს დედამიწის ვეგეტაციურმა — ფოტოსინთეზურმა — ბიოსფერომ მზის ნელი გაძლიერების

პირობებში. მკვლევრებმა გამოთვალეს 29 ცალკეული სტაციონარული კლიმატი და მათში ორი საილუსტრაციო საზღვრული შემთხვევა გაატარეს. სუსტი გამოფიტვისა და 400 ნაწილები per million-ზე ფიქსირებული CO2-ის პირობებში ხმელეთის მცენარეებისთვის მიღებული სიცხის ზღვრები დაახლოებით 1.68 და 1.87 მილიარდ წელიწადში დგება. ძლიერი გამოფიტვისა და 288 kelvin-ზე, დაახლოებით 15 გრადუს ცელსიუსზე, ფიქსირებული გლობალური საშუალო ტემპერატურის პირობებში ფოტოსინთეზისთვის მიღებული CO2-ის ზღვრები დაახლოებით 1.35, 1.64 და, საცდელი ზღვრით, 1.84 მილიარდ წელიწადში დგება. ხშირად ციტირებული 1.86 მილიარდი წელი უბრალოდ ორი ოპტიმისტური ზედა წერტილის დამრგვალებული საშუალოა. ეს სცენარზე დამოკიდებული მოდელური დიაპაზონებია და არა თარიღი, როდესაც დედამიწა, კაცობრიობა ან მთელი სიცოცხლე დასრულდება. მოდელი იყენებს წინასწარ განსაზღვრულ გზებს, დღევანდელ გეოგრაფიას, slab ocean-ს და არ აქვს ნიადაგ-მცენარეულობის ან კლიმატ-გამოფიტვის პირდაპირი უკუკავშირი; ყველაზე გრძელი შეფასებები კი გაურკვეველ სათბურისა და ოკეანის დაკარგვის საზღვრებს უახლოვდება.

ზედმეტი ხმაურის გარეშე: შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომი: ExoCAM-ის ამ კონფიგურაციაში, მზის გამოსხივების ზრდისა და ფიქსირებული CO2-ის პირობებში სამგანზომილებიანი კლიმატები ზოგადად ნაკლებად თბება, ვიდრე შედარებისთვის გამოყენებული გამარტივებული მოდელები. ორი წინასწარ განსაზღვრული გამოფიტვის საზღვრული შემთხვევისა და რამდენიმე მიღებული ბიოლოგიური ზღვრის ფარგლებში ვეგეტაციური ბიოსფეროს საზღვრები დაახლოებით 1.35–1.87 მილიარდ წლამდე მომავალში მოდის.

რა არის შესაძლებელი, მაგრამ დაუდგენელი: რომ ზოგიერთ CAM მცენარეს ან გახსნილი ბიკარბონატის მომხმარებელ წყლის მცენარეს ფოტოსინთეზის შენარჩუნება დაახლოებით ერთ part per მილიონი ატმოსფერულ CO2-მდე შეეძლოს; რომ ადაპტაციამ ან ტექნოლოგიამ ფოტოსინთეზური სიცოცხლე კიდევ უფრო გაახანგრძლივოს; და რომ რეალური კლიმატ-გამოფიტვის გზა ორ მოდელურ საზღვრულ შემთხვევას შორის დარჩეს.

რას არ აჩვენებს: ფიქსირებულ თარიღს ყველა მცენარის, მთელი სიცოცხლის, ადამიანური ცივილიზაციის, დედამიწის ოკეანეების ან პლანეტის დასასრულისთვის; მომდევნო ორი მილიარდი წლის ერთ უწყვეტ სიმულაციას; ან რაიმე მიზეზს დღევანდელი ადამიანის მიერ გამოწვეული კლიმატის ცვლილების მნიშვნელობის შესამცირებლად.

მთავარი შეზღუდვები: ერთი კლიმატური მოდელის ოჯახის 29 სტაციონარული შემთხვევა; წინასწარ განსაზღვრული და არა დინამიკურად დაკავშირებული გამოფიტვის გზები; დღევანდელი გეოგრაფია; slab ocean; ფიქსირებული მეთანი; ნულოვანი obliquity და eccentricity; ნიადაგის, მცენარეულობისა და ბიოსფეროს უკუკავშირის პირდაპირი მოდელის არქონა; გაურკვეველი სიცხისა და CO2-ის ბიოლოგიური ზღვრები; და მოდელებს შორის დიდი განსხვავება ნოტიო და runaway greenhouse პირობებთან ახლოს.

რამდენად უნდა ენდოს ფართო მკითხველი? მაღალი ნდობა, რომ კვლევა შესაძლო მოდელურ დიაპაზონს აფართოებს და მის მაკონტროლებელ დაშვებებს კარგად აჩვენებს. ზომიერი ნდობა რიცხვით დიაპაზონში როგორც ამ მოდელის ფარგლებში გამოსადეგ საზღვარში. დაბალი ნდობა ნებისმიერ ზუსტ თარიღში, რადგან ყველაზე შორეული წერტილები განზრახ უკიდურეს კლიმატურ გზებსა და გაურკვეველ ბიოლოგიაზეა დამოკიდებული.

წყაროები

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