The Clean Paper

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

পৃথিবী আর কত দিন সবুজ থাকতে পারে? একটি জলবায়ু মডেল একটি পরিসর দেয়, কোনো প্রলয়-তারিখ নয়

29টি ত্রিমাত্রিক জলবায়ু simulation পৃথিবীর সালোকসংশ্লেষী biosphere-এর জন্য এখন থেকে আনুমানিক 1.35 থেকে 1.87 বিলিয়ন বছরের মধ্যে ভিন্ন সীমা দেয়। মানগুলো শিলা weathering, তাপ এবং উদ্ভিদ ব্যবহার করতে পারে এমন সর্বনিম্ন কার্বন-ডাই-অক্সাইড মাত্রার ইচ্ছাকৃতভাবে সরলীকৃত পথের ওপর নির্ভর করে। এগুলো সব উদ্ভিদ, সব জীবন, সভ্যতা বা গ্রহ কখন শেষ হবে তা পূর্বাভাস দেয় না।

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

পৃথিবী আর কত দিন সবুজ থাকতে পারে? একটি জলবায়ু মডেলে একটি পরিসর দেয়, কোনো প্রলয়-তারিখ নয়

একটি পাতার জীবন খুব সংকীর্ণ কয়েকটি শর্তের ওপর নির্ভর করে। তার আলো, পানি, কার্বন ডাই-অক্সাইড এবং এমন তাপমাত্রা দরকার যা তার জৈবরাসায়ন সহ্য করতে পারে। মানুষের জীবনকালে এই সমীকরণে সূর্যকে প্রায় অপরিবর্তিত মনে হয়। এক বিলিয়ন বছরের মাপে তা নয়।

মূল ধারার নক্ষত্র হিসেবে সূর্যের বয়স বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে তার উজ্জ্বলতা ধীরে ধীরে বাড়ে। বেশি সূর্যালোক পৃথিবীকে উষ্ণ করে, কিন্তু গ্রহটির দীর্ঘমেয়াদি একটি প্রতিক্রিয়াও আছে: বৃষ্টির পানি, কার্বন ডাই-অক্সাইড ও সিলিকেট শিলার রাসায়নিক বিক্রিয়া বায়ুমণ্ডল থেকে কার্বন ডাই-অক্সাইড সরাতে পারে। এতে গ্রিনহাউস প্রভাব কমে এবং কিছু উষ্ণায়ন সামলে যায়। কিন্তু যে প্রতিক্রিয়া গ্রহকে ঠান্ডা রাখে, সেটিই একসময় সালোকসংশ্লেষী জীবদের জীবন্ত টিস্যু তৈরির জন্য প্রয়োজনীয় কার্বন থেকে বঞ্চিত করতে পারে।

নতুন একটি *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* গবেষণাপত্র জিজ্ঞেস করছে, ভবিষ্যৎ পৃথিবীতে সালোকসংশ্লেষী জীবনের জন্য কোন সীমা আগে আসতে পারে: অতিরিক্ত তাপ, নাকি খুব কম carbon dioxide। এর উত্তর পৃথিবী “মরে যাওয়ার” কোনো নির্দিষ্ট তারিখ নয়। ইচ্ছাকৃতভাবে সরলীকৃত ভবিষ্যতের দুটি পথে গৃহীত সীমাগুলো এখন থেকে আনুমানিক **1.35 থেকে 1.87 বিলিয়ন বছরের** মধ্যে পড়ে।

এই পরিসরটি **উদ্ভিদনির্ভর জীবমণ্ডল** নিয়ে—পৃথিবীর জীবমণ্ডলের সেই অংশ, যা সালোকসংশ্লেষী জীব, বিশেষত উদ্ভিদ ও আলো এবং কার্বন ডাই-অক্সাইডকে জৈব পদার্থে রূপান্তরকারী অন্যান্য জীবের ওপর নির্ভরশীল। এটি সব অণুজীবের ভবিষ্যদ্বাণী নয়। এটি মানবসভ্যতার আয়ু নয়। এটি গ্রহটির আয়ুও নয়।

গ্রহের তাপমাত্রা-নিয়ন্ত্রকের দুটি অনিশ্চিতি বিন্যাস

কেন্দ্রীয় অনিশ্চয়তা হলো **সিলিকেট আবহবিকার**। কার্বন ডাই-অক্সাইড বৃষ্টির পানিতে দ্রবীভূত হয়, সিলিকেট শিলার সঙ্গে বিক্রিয়া করে এবং শেষে পর্যন্ত সমুদ্র ও পলির দিকে বহন হয়। ভূতাত্ত্বিক সময়ে আগ্নেয়গিরি আবার কার্বন ডাই-অক্সাইড ফিরিয়ে দেয়। এই প্রক্রিয়াগুলো একসঙ্গে কার্বনেট-সিলিকেট চক্রের অংশ, যাকে প্রায়ই গ্রহের তাপমাত্রা-নিয়ন্ত্রক বলা হয়।

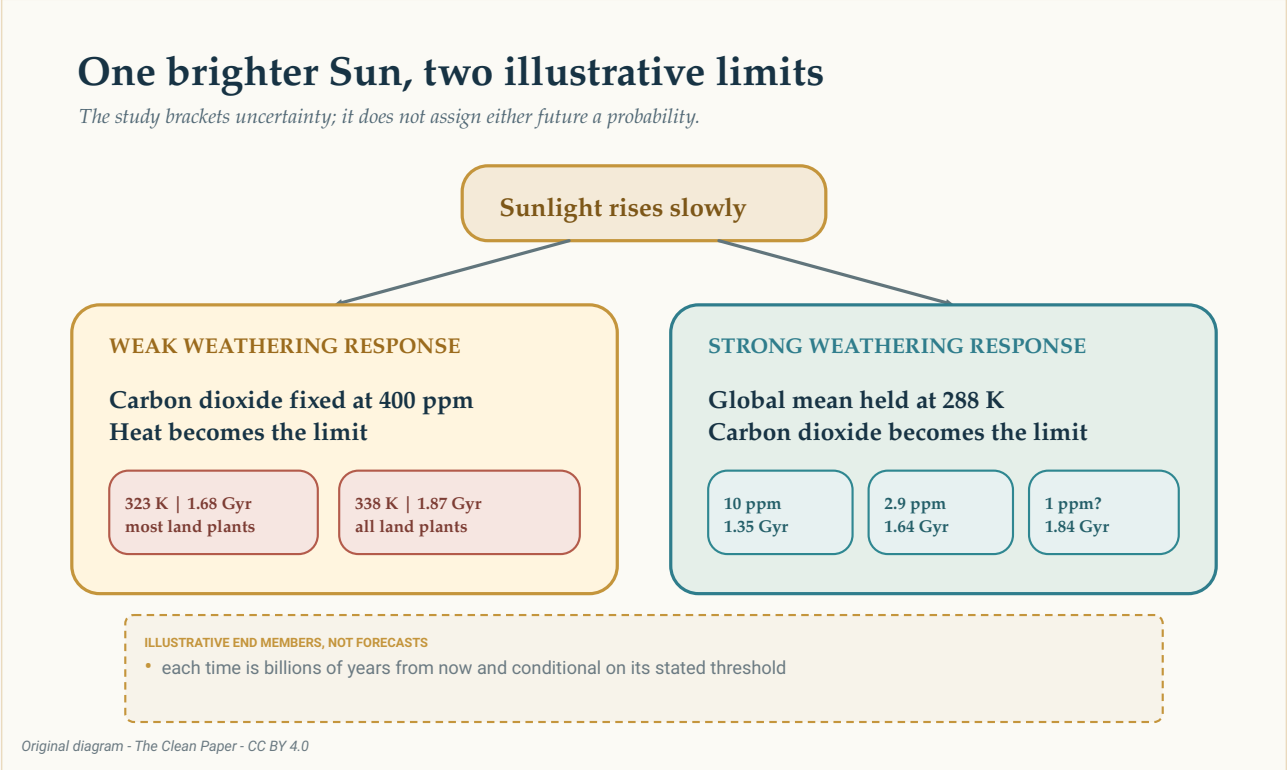
উষ্ণ ও বেশি আর্দ্র পৃথিবীতে আবহবিকার দ্রুত হতে পারে এবং বায়ুমণ্ডল থেকে কার্বন ডাই-অক্সাইড আরও দ্রুত সরাতে পারে। কিন্তু ভবিষ্যতের আরও উজ্জ্বল সূর্যের অধীনে এই প্রতিক্রিয়া পৃথিবীকে কত শক্তভাবে নিয়ন্ত্রণ করবে, তা বিজ্ঞানীরা জানেন না। তাই Jacob Haqq-Misra ও Eric Wolf একটি “সঠিক” পথ বেছে নেননি। তারা দুটি **শেষ সদস্য** মডেল করেছেন—অনিশ্চয়তার সীমানা বোঝাতে ইচ্ছাকৃতভাবে চরম দুটি অবস্থা।

- **দুর্বল-আবহবিকার শেষ সদস্য**-এ বায়ুমণ্ডলের কার্বন ডাই-অক্সাইড 400 অংশগুলো প্রতি মিলিয়নে স্থির থাকে, আর উজ্জ্বলতর সূর্য তাপমাত্রা বাড়ায়।
- **শক্তিশালী-আবহবিকার শেষ সদস্য**-এ বৈশ্বিক গড় পৃষ্ঠতাপমাত্রা 288 কেলভিন, অর্থাৎ প্রায় 15 ডিগ্রি সেলসিয়াসে স্থির থাকে, আর সূর্যালোক বাড়ার সঙ্গে কার্বন ডাই-অক্সাইড কমে।

কোনো শাখাকেই পৃথিবীর প্রকৃত ভবিষ্যৎ হিসেবে উপস্থাপন করা হয়নি। প্রথমটি জিজ্ঞেস করে, কার্বন ডাই-অক্সাইড বেশি থাকলে তাপ কী করবে। দ্বিতীয়টি জিজ্ঞেস করে, আবহবিকার যদি বৈশ্বিক তাপমাত্রাকে আজকের গড়ের কাছাকাছি ধরে রাখে, তবে কার্বনের অভাব কী করবে।

> **আবহবিকার কীভাবে তাপমাত্রা-নিয়ন্ত্রকের মতো কাজ করতে পারে?**
>
> এই তুলনাটি প্রতিক্রিয়া নিয়ে, সত্যিকারের কোনো নিয়ন্ত্রণ knob নিয়ে নয়। উষ্ণ জলবায়ু রাসায়নিক আবহবিকার দ্রুত করলে

বায়ুমণ্ডলরে আরও বশেি কার্বন ডাই-অক্সাইড দ্রবীভূত পদার্থ, খনজি ও পলতিে চলে যতেে পার।ে এই গ্রনিহাউস গ্যাস সরানো প্রথম দফার কছিু উষ্ণায়নরে বপিরীতে কাজ কর।ে খুব দীর্ঘ সময়ে আগ্নয়েগরিরি গ্যাস নর্িগমন আবার কার্বন ডাই-অক্সাইড ফরিয়িে দয়ে।
প্রতটিি ধাপরে শক্তি নর্িভর কর বৃষ্টি, উন্মুক্ত শলিা, ক্ষয়, জীববজ্িঞান, tectonics ও সমুদ্ররে রসায়নরে ওপর। তাই গবষেণাপত্রটি তাপমাত্রা-নয়িন্ত্রককে জানা কোনো যন্ত্র ধরে না নয়িে সীমান্তবর্তী প্রতক্রিয়িাগুলো পরীক্ষা কর।ে



গবষেণাপত্রটি অনশ্চিতি ভবষ্যিৎকে দুটি উদাহরণমূলক শষে সদস্য দয়িে ঘরিে ধর।ে আবহবকিার দুর্বল সাড়া দলিে বাড়তে থাকা তাপ স্থলউদ্ভদিরে জন্য গৃহীত সীমায় পৌঁছায়। শক্তশিালী সাড়া দলিে কমতে থাকা কার্বন ডাই-অক্সাইড সালোকসংশ্লষেরে জন্য গৃহীত সীমায় পৌঁছায়। এগুলো শর্তসাপক্ষে মডলে শাখা, সম্ভাবনা বা উল্টো গণনার তারখি নয়।

The Clean Paper CC BY 4.0

29টি স্থতিশিীল মডলে-পৃথবিী, দুই বলিয়িন বছররে একটানা সনিমো নয়

গবষেকরো ExoCAM নামে একটি ত্রমিাত্রকি বশৈ্বকি জলবায়ু মডলে ব্যবহার করে বশেি সূর্যালোক ও কম কার্বন ডাই-অক্সাইডরে বভিন্নি সমন্বয়ে **29টি স্থর্ি-অবস্থা জলবায়ু** হসিাব করছেনে। প্রতটিি কসে 70 মডলে বছর চালানো হয়ছে।ে এখানে এক মডলে বছর হলো স্থর্ি শর্তে সমিুলটে করা একটি বার্ষকি চক্র—কৃত্রমি জলবায়ুকে স্থতিশিীল হতে দওেয়ার runtime; পৃথবিীর ভবষ্যিৎকে বছর ধরে বছর এগয়িে নওেয়া পূর্বাভাসরে একটি ধাপ নয়। সমিুলটেডে জলবায়ু স্থর্ি হওয়ার সময় পাওয়ার পর শষে 20 বছররে গড় নওেয়া হয়ছে।ে

এই 29টি কসে আলাদা আলাদা মডলে জগৎ। প্রতটিি চালনা একটি grid-এর একটি বন্দিু, যার প্রশ্ন: “নর্িবাচতি সূর্যালোক ও কার্বন ডাই-অক্সাইডরে এই জোড়ার সঙ্গে কোন স্থতিশিীল জলবায়ু মলে?” কম্পউিটার আজকরে পৃথবিী দয়িে শুরু করে পররে দুই বলিয়িন বছর ধরে তার বায়ুমণ্ডল, শলিা, সমুদ্র ও জীবজগতকে একটানা ববির্ততি হয়নি। বরং লখেকরো আগে থকেে হসিাব করা এই বন্দিুগুলোর মধ্য দয়িে দুটি রূপরখো

আবহবিকার পথ অনুসরণ করছেন; বিন্দুগুলোর মাঝের পথ নিজে সিমুলেশন করা হয়নি।

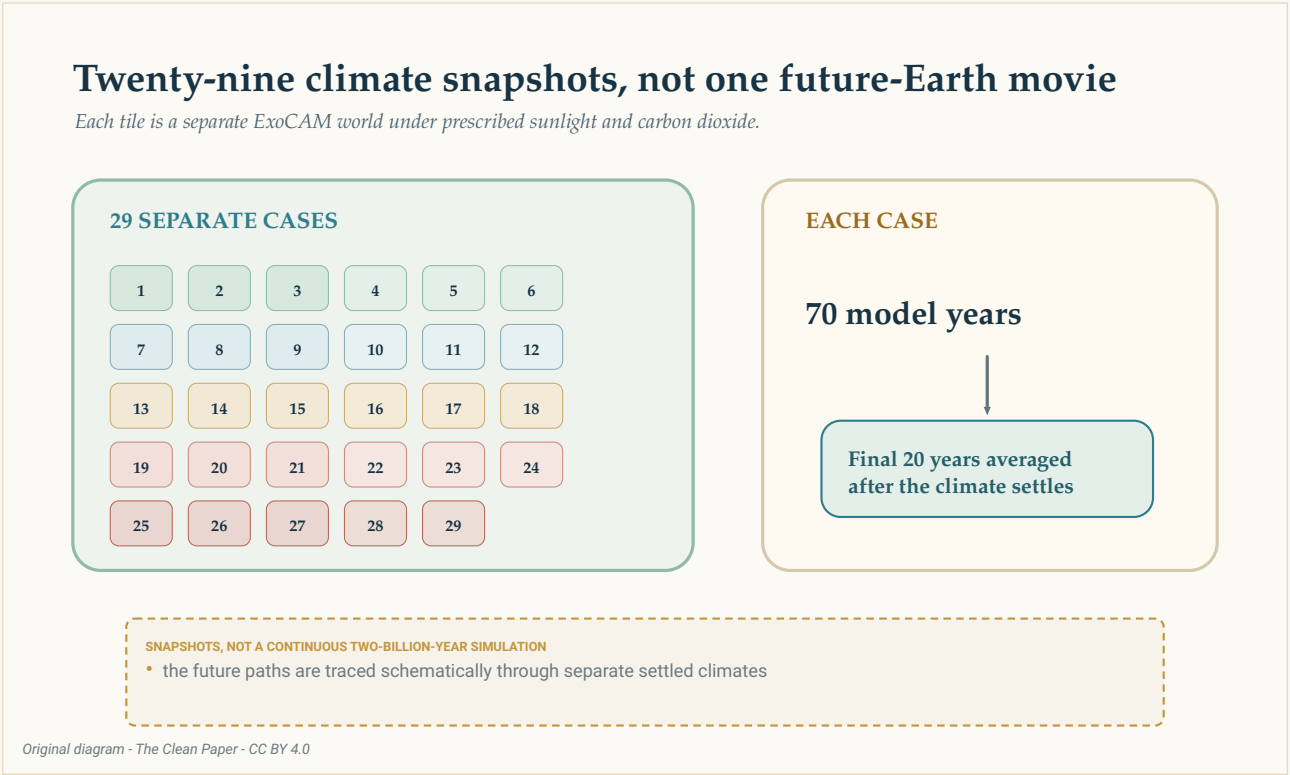
সারণিটি সরকারি মডেল-তথ্য সংরক্ষণাগার-এ থাকা সূর্যালোক ও কার্বন ডাই-অক্সাইডের সমন্বয়গুলো পুনরুৎপাদন করে। কেস ID এখানে সংরক্ষণাগারের ক্রমে পড়ার সুবিধার জন্য যোগ করা। **S/S0** হলো আপেক্ষিক সৌর স্থিরাঙ্ক: মডেলে ব্যবহৃত আগত সৌরশক্তি তার বর্তমান মান S0 দিয়ে ভাগ করা। তাই 1.2 মানে আজকের তুলনায় 20 শতাংশ বেশি আগত সৌরশক্তি। **CO2 (ppm)** হলো প্রতি দশ লক্ষ বায়ুমণ্ডলীয় অণুতে কার্বন ডাই-অক্সাইড অণুর অনুপাত।

কেস 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

মডেল-পৃথিবীটি পরিচিত পৃথিবীর মতো, তবে ইচ্ছাকৃতভাবে সীমিত। এর আকার পৃথিবীর সমান এবং বর্তমান ভূগোল ব্যবহার করা হয়েছে। পুরোপুরি সঞ্চালিত সমুদ্রের বদলে সরল স্তর-মহাসাগর, প্রায় বর্তমান বায়ুচাপ (1 bar) এবং স্থির methane ধরা হয়েছে। কক্ষপথ নিখুঁত বৃত্তাকার, আর ঘূর্ণন অক্ষরে কোনো হেলন নেই। মাটি, উদ্ভিদাবরণ বা পরিবর্তনশীল biosphere feedback স্পষ্টভাবে model করা হয়নি। সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ, climate model-টি rock-weathering model-এর সঙ্গে গতিশীলভাবে coupled নয়। অর্থাৎ ExoCAM weathering হিসাব করে, সেই ফল দিয়ে CO_2 বদলে আবার feedback loop-এ পরের climate চালায় না। গবেষকেরা বরং দুটি সীমান্তবর্তী পথ নির্ধারণ করে 29-case climate grid-এর মধ্যে সেগুলো অনুসরণ করছেন।

জলবায়ু মডলে “স্থরি অবস্থা” বলতে কী বে ঝায়?

স্থরি-অবস্থা কসে হলে া নর্িবাচতি একটি সূর্য ও বায়ুমণ্ডলরে অধীনে স্থতি হতে দওেয়া মডলে জলবায়ু। সমিুলশেনরে ভতেরে দনি থকেে দনি ও বছর থকেে বছর আবহাওয়া বদলাতে থাকে, কন্িতু দীর্ঘময়োদি গড় আর খুব বশেি সরে না।
“এই শর্তে কে ান জলবায়ু মলে?”—এই প্রশ্নরে জন্য এটি উপযে াগী। বাস্তব পৃথিবী এক শর্ত থকেে পররে শর্তে ঠকি কে ান পথে যাবে, তার পূর্বাভাস দওেয়া আলাদা বষিয়।



প্রতটিি tile হলে া 70 মডলে বছর চালানে া আলাদা ExoCAM জলবায়ু চালনা, যার শষে 20 বছররে গড় নওেয়া হয়ছে। গবষেণাটি নর্িধারতি সূর্যালে াক ও কার্বন ডাই-অক্সাইড অবস্থায় 29টি স্থতি জলবায়ু নমুনা নয়িছে; দুই বলিয়িন বছর ধরে একটানা বদলানে া একটি পৃথিবী সমিুলশেন করনে।

The Clean Paper CC BY 4.0

শষে সদস্য এক: যথষ্টে কার্বন ডাই-অক্সাইড, অতরিক্তি তাপ

দুর্বল-আবহবকিার শাখায় কার্বন ডাই-অক্সাইড 400 অংশগুলে া প্রতি মলিয়িনে স্থরি থাকে। সে ারশক্তি বাড়ার সঙ্গে তাপ সীমাবদ্ধকারী কারণ হয়ে ওঠে।

গবষেণাপত্রটি আগরে কাজ থকেে নওেয়া বশৈ্বকি গড় তাপমাত্রার দুটি সীমা ব্যবহার কর:

- বশৈ্বকি বার্ষকি গড় 323 **কলেভনি**, অর্থাৎ প্রায় 50 **ডগ্রিসিলেসয়িাস** হলে পৃথিবীকে অধকিাংশ স্থলউদ্ভদিরে জন্য অতরিক্তি গরম ধরা হয়ছে। মডলেটি এই সীমায় পৌঁছায় প্রায় 1.68 **বলিয়িন বছর**।
- বশৈ্বকি বার্ষকি গড় 338 **কলেভনি**, অর্থাৎ প্রায় 65 **ডগ্রিসিলেসয়িাস** হলে পৃথিবীকে সব স্থলউদ্ভদিরে জন্য অতরিক্তি গরম ধরা হয়ছে। মডলেটি এই সীমায় পৌঁছায় প্রায় 1.87 **বলিয়িন বছর**।

এগুলো গৃহীত জৈবিক সীমা; এমন সর্বজনীন তাপমাত্রা নয় যেখানে প্রতিটি সালোকসংশ্লেষী জীব অবশ্যই ব্যর্থ হবে। বৈশ্বিক গড় বড় আঞ্চলিক পার্থক্যও আড়াল করে। গবেষণাটি আলাদাভাবে দেখে কোথায় তাপমাত্রা ও পানির সমন্বয় উপযোগী থাকতে পারে, কিন্তু জলবায়ু মানচিত্রের একটি লেবেলে ভবিষ্যতের প্রতিটি আশ্রয়স্থল বা অভিযোজনের তালিকা দিতে পারে না।

শেষ সদস্য দুই: সহনীয় তাপমাত্রা, খুব কম কার্বন ডাই-অক্সাইড

শক্তিশালী-আবহবিকার শাখায় বৈশ্বিক গড় তাপমাত্রা 288 কেলভিন, অর্থাৎ প্রায় 15 ডিগ্রি সেলসিয়াসে রাখা হয়, আর বায়ুমণ্ডলীয় কার্বন ডাই-অক্সাইড কমে। এখানে উত্তর নির্ভর করে ভিন্ন সালোকসংশ্লেষী পথ কত কম কার্বন ব্যবহার করতে পারে তার ওপর।

- প্রচলিত **10 অংশগুলো প্রতি মিলিয়ন** সীমায়—প্রতি দশ লক্ষ বায়ুমণ্ডলীয় অণুতে 10টি কার্বন ডাই-অক্সাইড অণু—C4 সালোকসংশ্লেষের সীমা আসে প্রায় **1.35 বিলিয়ন বছরে**। C4 সালোকসংশ্লেষে ভুট্টা ও আখসহ বিভিন্ন উদ্ভিদ ব্যবহার করে এবং যে এনজাইম কার্বন স্থির করে তার চারদিকে কার্বন ডাই-অক্সাইড ঘনীভূত করে।
- আগের গবেষণায় আলোচিত বিকল্প **2.9 অংশগুলো প্রতি মিলিয়ন** C4 সীমা ব্যবহার করলে সময়টি যায় প্রায় **1.64 বিলিয়ন বছরে**।
- পরীক্ষামূলকভাবে অনিশ্চিত **1 ppm** সীমা—কিছু CAM plant, অর্থাৎ crassulacean acid metabolism ব্যবহারকারী উদ্ভিদ, যেখানে রাতের CO_2 গ্রহণ দিনের ব্যবহারের থেকে আলাদা; অথবা দ্রবীভূত bicarbonate ব্যবহার করতে সক্ষম জলজ উদ্ভিদের সম্ভাব্য টিকে থাকার সঙ্গে যুক্ত—সময়টিকে প্রায় **1.84 বিলিয়ন বছরে** নিয়ে যায়।

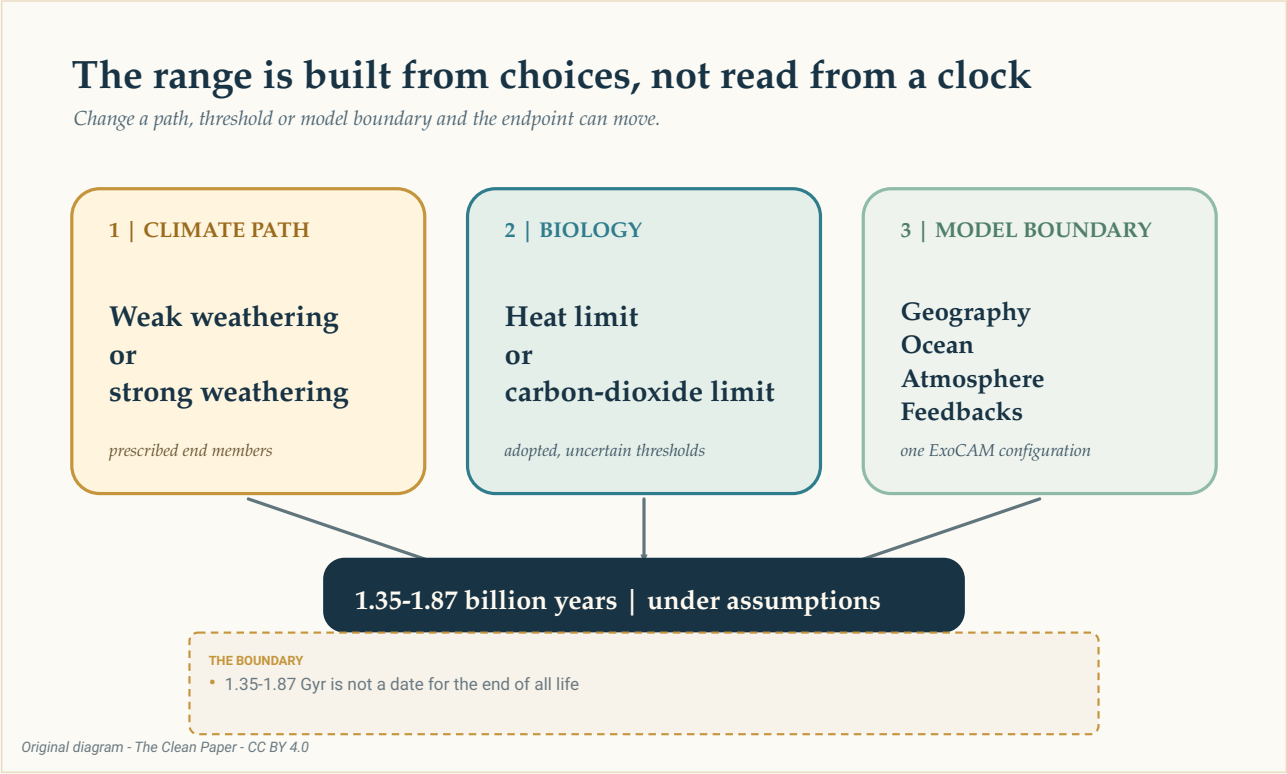
শেষ সংখ্যাটির সঙ্গে সবচেয়ে বড় জৈবিক সতর্কতা আছে। লেখকেরা একটি-অংশ-প্রতি-মিলিয়ন সীমাটিকে স্পষ্টভাবেই প্রাথমিক বলছেন। ভবিষ্যৎ-পৃথিবীর অবস্থায় সব CAM উদ্ভিদ বা জলজ উদ্ভিদের জন্য এটি পরীক্ষায় প্রতিষ্ঠিত বেঁচে থাকা সীমা নয়।

> **C3, C4 এবং CAM হলো কৌশল, কোনো সাঁড়ি নয়**
>
> উদ্ভিদ কার্বন ধরতে বিভিন্ন জৈবরাসায়নিক পথ ব্যবহার করে। **C3 সালোকসংশ্লেষে** সবচেয়ে সাধারণ। ভুট্টা ও আখসহ বিভিন্ন উদ্ভিদে থাকা **C4 সালোকসংশ্লেষে** কার্বন স্থিরিকারী এনজাইমের চারদিকে কার্বন ডাই-অক্সাইড ঘনীভূত করে এবং কার্বন ডাই-অক্সাইড কম হলে তুলনামূলকভাবে ভালো কাজ করতে পারে। **Crassulacean অ্যাসিড বিপাক (CAM)** রাত ও দিনের মধ্যে কার্বন গ্রহণ ও ব্যবহারকে আলাদা করে, যা বহু উদ্ভিদকে পানি বাঁচাতে সাহায্য করে।
>
> এগুলো বহু প্রজাতি-মাত্রা পার্থক্যসহ কৌশলের পরিবার; “আরও ভালো” উদ্ভিদের ধারাবাহিক ধাপ নয়। গবেষণাপত্রের খুব কম কার্বন ডাই-অক্সাইড সীমাগুলো সম্ভাব্য সীমানা অনুসন্ধানের অনুমান, ভবিষ্যৎ বাস্তুতন্ত্র অবশ্যই সেগুলো ব্যবহার করার জন্য বিবর্তিত হওয়া করবে—এমন নিশ্চয়তা নয়।

1.86 বিলিয়ন বছর কেন expiry তারিখ নয়

গবেষণাপত্রের বহুল-উদ্ধৃত আনুমানিক **1.86 বিলিয়ন বছর** হলো দুটি আশাবাদী সর্বোচ্চ শেষবিন্দুর গড়: কার্বন-ডাই-অক্সাইড-সীমিত শাখায় 1.84 বিলিয়ন বছর এবং তাপ-সীমিত শাখায় 1.87 বিলিয়ন বছর। এটি দুটি ভিন্ন পরিস্থিতির সংক্ষিপ্ত সারাংশ। এটি বেশি নির্ভুলতা-সহ তৃতীয় কোনো মডেল ফল নয়, এবং সরো-অনুমান তারিখ-ও নয়।

এমনকি 1.35 থেকে 1.87 বিলিয়ন বছরের বিস্তৃত পরিসরটিরও একক কোনো সম্ভাবনা নেই। নিচের ও ওপরের মানগুলো নির্ভর করে ভিন্ন আবহবিকার অনুমান, ভিন্ন জৈবিক সীমা এবং একটি জলবায়ু-মডেলে বিন্যাসের ওপর। এই পরিসর যতটা সময় মাপে, ততটাই পরীক্ষার পছন্দগুলোকেও প্রতিফলিত করে।



1.35 থেকে 1.87 বিলিয়ন বছরের পরিসরটি আসে আবহবিকার পথ, জৈবিক সীমা এবং মডেল সীমা বেছে নেওয়ার পর। এটি অনুমান মানচিত্র, সব জীবনের বিলুপ্তিতে শেষ হওয়া কোনো ঘড়ি নয়।

The Clean Paper CC BY 4.0

অন্য সীমা আগে আসতে পারে

উদ্ভিদনির্ভর জীবমণ্ডলের সবচেয়ে দীর্ঘ অনুমানগুলো আরকেটি আলাদা ও অনিশ্চিত সীমার কাছে পৌঁছে যায়: আর্দ্র বা নিয়ন্ত্রণহীন গ্রিনহাউস, যা সমুদ্রের বড় অংশ হারানোর দিকে নিয়ে যেতে পারে। সূর্যালোক বাড়ার সঙ্গে এই অবস্থাগুলো কখন শুরু হবে তা নিয়ে জলবায়ু মডেলগুলোর মধ্যে বড় মতভেদ আছে, বিশেষত বর্তমান অবস্থা থেকে অনেক দূরে। কিছু অনুমান এগুলোকে সবচেয়ে আশাবাদী সালোকসংশ্লেষে সীমার আগেই স্থাপন করে।

তাই ওপরের শাখাকে এমন প্রতিশ্রুতি হিসেবে পড়া যাবে না যে এখন থেকে 1.87 বিলিয়ন বছর পর্যন্ত পৃথিবী তার সমুদ্র, পরিচিতি মহাদেশ বা বাসযোগ্য পৃষ্ঠের অবস্থা ধরে রাখবেই। মডেলে ভবিষ্যৎ প্লেট টেকটনিক্স, স্থলভাগের পরিবর্তন, বিবর্তনশীল বাস্তুতন্ত্র বা সম্পূর্ণ dynamic মহাসাগর-ও নেই। বায়ুমণ্ডল কীভাবে শক্তি শোষণ ও বিকিরণ করে তার হিসাবকেও খুব তীব্র সূর্যালোক ও অত্যন্ত কম কার্বন ডাই-অক্সাইডের এমন অবস্থায় নেওয়া হচ্ছে, যেখানে ভিন্ন মডেল একমত নয়।

বিবর্তনীয় অভিযোজন ও প্রযুক্তিগত হস্তক্ষেপে গবেষণাপত্রের আলোচনায় সম্ভাবনা হিসেবে এসেছে। এগুলো 29টি জলবায়ু সিমুলেশনের আউটপুট নয়। মডেলে ভবিষ্যৎ জীবকে একটি-অংশ-প্রতি-মিলিয়ন সালোকসংশ্লেষী পথ বিবর্তিত হতে দেখায় না, এবং কোনো সভ্যতাকে এক বিলিয়ন বছর ধরে বায়ুমণ্ডল পরিচালনা করতেও দেখায় না।

এটি আজকের জলবায়ু সংকট নিয়ে কোনো ফল নয়

সূর্যের উজ্জ্বলতা বৃদ্ধি শত শত মিলিয়ন থেকে বিলিয়ন বছরের সময়মাত্রায় ঘটে। আধুনিক মানবসৃষ্ট উষ্ণায়ন কয়েক দশক ও শতকে গ্রিনহাউস গ্যাস দ্রুত বাড়ার কারণে ঘটে। এগুলো সম্পূর্ণ ভিন্ন সময়মাত্রার ভিন্ন forcing এবং ভিন্ন প্রশ্নের উত্তর দেয়।

এই গবেষণার কিছুই বর্তমান জলবায়ু পরিবর্তনের প্রমাণকে দুর্বল করে না বা পদক্ষেপ পিছিয়ে দেওয়ার যুক্তি দেয় না। দূর ভবিষ্যতের কোনো মডেলে পরিস্থিতি-তে কিছু সালোকসংশ্লেষী জীবন টিকে থাকতে পারে—এটি আজকের সমাজ ও বাস্তুতন্ত্র নিরাপদ থাকবে এমন জলবায়ুর সমান নয়।

গবেষণাপত্রটির মূল্য হলো এটি খুব দূরের একটি প্রশ্নকে আরও নিয়মতান্ত্রিক করে। এটি দেখায়, সূর্যালোক বাড়লেও কার্বন ডাই-অক্সাইড স্থির রাখা তুলনামূলক সরল আগের মডেলগুলো হয়তো অতিরিক্ত উষ্ণতা দেখিয়েছিল; এবং সালোকসংশ্লেষী জীবনের টিকে থাকার পথ একটি প্রচলিত কার্বন সীমার চেয়ে বেশি হতে পারে। পাশাপাশি এটি দেখায়, বাড়তি প্রতিটি এক-বিলিয়ন-বছরের ভগ্নাংশের সঙ্গে অনুমানের একটি শৃঙ্খল জুড়ে থাকে।

একটি পাতাকে যে সূর্য শক্তি দেয়, সেই সূর্য ধীরে ধীরে বদলাচ্ছে। পৃথিবী আরও 1.35, 1.87 বা অন্য কোনো সংখ্যক বিলিয়ন বছর সবুজ থাকবে কি না, তা নির্ভর করবে শিলা, পানি, বায়ুমণ্ডল ও জীবন একসঙ্গে কীভাবে প্রতিক্রিয়া করে তার ওপর। সৎ ফলটি কোনো তারিখ নয়। এটি ওই সমীকরণটিকে আরও বিস্তৃতভাবে দেখা।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

একটি ত্রিমাত্রিক জলবায়ু গবেষণা জিএসএম করছে, সূর্য ধীরে ধীরে উজ্জ্বল হলে পৃথিবীর উদ্ভিদনির্ভর—অর্থাৎ সালোকসংশ্লেষী—জীবমণ্ডল কত দিন টিকে থাকতে পারে। গবেষকেরা 29টি আলাদা স্থির-অবস্থা জলবায়ু হিসাব করে তার মধ্যে দিয়ে দুটি উদাহরণমূলক শেষ সদস্য অনুসরণ করেছেন। দুর্বল আবহবিকার এবং কার্বন ডাই-অক্সাইড 400 অংশগুলো প্রতি মিলিয়নে স্থির থাকলে স্থলউদ্ভিদের জন্য গৃহীত তাপসীমা আসে এখন থেকে প্রায় 1.68 ও 1.87 বিলিয়ন বছর। শক্তিশালী আবহবিকার এবং বৈশ্বিক গড় তাপমাত্রা 288 কেলভিন, প্রায় 15 ডিগ্রি সেলসিয়াস স্থির থাকলে সালোকসংশ্লেষের জন্য গৃহীত কার্বন-ডাই-অক্সাইড সীমা আসে প্রায় 1.35, 1.64 এবং একটি প্রাথমিক সীমা ব্যবহার করলে 1.84 বিলিয়ন বছর। বহুল-উদ্ধৃত 1.86 বিলিয়ন বছর কেবল দুটি আশাবাদী উপরের শেষবিন্দুর গোলাকার গড়। এগুলো পরিস্থিতি-নির্ভর মডেল পরিসর, পৃথিবী, মানবজাতি বা সব জীবনের শেষ হওয়ার তারিখ নয়। মডেল নির্ধারিত পথ, বর্তমান ভূগোল, স্তর মহাসাগর ব্যবহার করে; স্পষ্ট মাটি–উদ্ভিদাবরণ বা জলবায়ু–আবহবিকার সংযোজন নেই; আর সবচেয়ে দীর্ঘ অনুমান অনিশ্চিত গ্রিনহাউস ও মহাসাগর-ক্ষতি সীমার কাছে পৌঁছে যায়।

সরাসরি যাচাই

গবেষণাপত্রটি কী দেখায়: ExoCAM-এর এই বিন্যাসে সূর্যালোক বাড়া ও কার্বন ডাই-অক্সাইড স্থির রাখার অবস্থায় ত্রিমাত্রিক জলবায়ু সাধারণত তুলনার জন্য ব্যবহৃত সরলীকৃত মডেলের চেয়ে কম উষ্ণ হয়। নির্ধারিত দুটি আবহবিকার শেষ সদস্য এবং কয়েকটি গৃহীত জৈবিক সীমার মধ্যে উদ্ভিদনির্ভর জীবমণ্ডলের সীমা এখন থেকে আনুমানিক 1.35 থেকে 1.87 বিলিয়ন বছরের মধ্যে পড়ে।

কী সম্ভবপর, কিন্তু প্রতিষ্ঠিত নয়: কিছু CAM উদ্ভিদ বা দ্রবীভূত বাইকার্বোনেট ব্যবহারকারী জলজ উদ্ভিদ বায়ুমণ্ডলীয় কার্বন ডাই-অক্সাইড একটি অংশ প্রতি মিলিয়নের কাছাকাছিও সালোকসংশ্লেষে চালাতে পারে; অভিযোজন বা প্রযুক্তি সালোকসংশ্লেষী জীবন আরও দীর্ঘ করতে পারে; এবং বাস্তব জলবায়ু-আবহবিকার পথ দুটি মডেল শেষ সদস্যের মাঝেই থাকবে।

এটি কী দেখায় না: সব উদ্ভিদ, সব জীবন, মানবসভ্যতা, পৃথিবীর সমুদ্র বা গ্রহের শেষ হওয়ার স্থির তারিখ; পরের দুই বিলিয়ন বছরের একটানা সিমুলেশন; অথবা বর্তমান মানবসৃষ্ট জলবায়ু পরিবর্তনকে কম গুরুত্ব দেওয়ার কোনো কারণ।

প্রধান সীমাবদ্ধতা: একটি জলবায়ু-মডেল পরিবার থেকে 29টি স্থিরি-অবস্থা কেসে; গতিশীলভাবে যুগ্ম নয়, নির্ধারিত আবহবিকার পথ; বর্তমান ভূগোল; স্তর মহাসাগর; স্থির মথিনে; শূন্য অক্ষ-হেলন ও উৎকেন্দ্রিকতা; স্পষ্ট মাটি, উদ্ভিদাবরণ বা জীবমণ্ডল প্রতিক্রিয়া নেই; অনিশ্চিত তাপ ও কার্বন-ডাই-অক্সাইড সীমা; এবং আর্দ্র ও নিয়ন্ত্রণহীন গ্রিনহাউস অবস্থার কাছে মডেলগুলোর বড় মতভেদ।

সাধারণ পাঠকরে কতটা আস্থা রাখা উচিত? গবেষণাটি সম্ভাব্য model range-কে প্রসারিত করে এবং কোন অনুমানগুলো সেই range নিয়ন্ত্রণ করে তা চিহ্নিত করছে—এ বিষয়ে উচ্চ আস্থা রাখা যায়। এই model-এর ভেতরে সংখ্যাগত পরিসরটিকে একটি উপযোগী **সীমাবদ্ধ পরিসর** হিসেবে নেওয়ায় মাঝারি আস্থা রাখা যায়। নির্দিষ্ট কোনো তারিখে আস্থা কম, কারণ সবচেয়ে দূরের endpoint-গুলো ইচ্ছাকৃতভাবে চরম climate path ও অনিশ্চিত biology-এর ওপর নির্ভর করে।

উৎস

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