The Clean Paper

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

Earth कितने समय तक हरीरह सकतीहै? climate model range देताहै, doomsday date नहीं

29 three-dimensional climate simulations Earth कीphotosynthetic biosphere के अलग limits आज से लगभग 1.35 से 1.87 billion years के बीच रखतीहैं। values rock weathering, heat और plants द्वाराउपयोग कएि जासकने वाले lowest carbon-dioxide levels के deliberately simplified paths पर depend करतीहैं। वे यह predict नहींकरतींकि all plants, all life, civilization याplanet कब खत्म होगे।

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

पृथ्वी कितने समय तक हरी रह सकती है? जलवायु मॉडल एक दायरा देता है, प्रलय की तारीख नहीं

एक पत्ता बहुत संकरी परिस्थितियों के भीतर जीता है। उसे प्रकाश, पानी, कार्बन डाइऑक्साइड और ऐसा तापमान चाहिए जिसे उसकी जैवरासायनिकी सह सके। मानव जीवनकाल में सूर्य इस समझौते को स्थिर हिस्सा लगता है। अरबों वर्षों के पैमाने पर ऐसा नहीं है।

मुख्य अनुक्रम पर उम्र बढ़ने के साथ सूर्य धीरे-धीरे अधिक चमकीला होता है। अधिक सूर्यप्रकाश पृथ्वी को गरम करता है, लेकिन ग्रह की एक दीर्घकालिक प्रतिक्रिया भी है: वर्षाजल, कार्बन डाइऑक्साइड और सिलिकेट चट्टानों के बीच होने वाली प्रतिक्रियाएँ वायुमंडल से कार्बन डाइऑक्साइड निकाल सकती हैं। इससे ग्रीनहाउस प्रभाव कमजोर होता है और गरमाहट का कुछ हिस्सा कम हो सकता है। लेकिन ग्रह को ठंडा करने वाली यही प्रक्रियाएँ आखिर कार प्रकाश-संश्लेषी जीवों को उस कार्बन से वंचित कर सकती है जिससे वे जीवित ऊतक बनाते हैं।

नया Journal of Geophysical Research: Atmospheres शोधपत्र पूछता है कि किस-सीमा पहले आएगी बहुत अधिक गरमी या बहुत कम कार्बन डाइऑक्साइड। उसका उत्तर पृथ्वी की मृत्यु-तिथि नहीं है। जानबूझकर सरल बनाए गए दो भविष्य-मार्गों में प्रकाश-संश्लेषी जीवन के लिए अपनाई गई सीमाएँ आज से लगभग **1.35 से 1.87 अरब वर्ष** के बीच आती हैं।

यह दायरा **वनस्पति-आधारित जीवमंडल** (vegetative biosphere) के लिए है: पृथ्वी के जीवित तंत्र का वह हिस्सा जो प्रकाश-संश्लेषी जीवों पर टिका है, खासकर पौधों और दूसरे जीवों पर जो प्रकाश तथा कार्बन डाइऑक्साइड को जैविक पदार्थ में बदलते हैं। यह हर सूक्ष्मजीव के भविष्य का अनुमान नहीं, मानव सभ्यता की आयु नहीं और ग्रह की आयु भी नहीं।

ग्रह के "थर्मोस्टैट" में दो बड़ी अनिश्चितताएँ हैं

मुख्य अनिश्चितता **सिलिकेट अपक्षय** है। कार्बन डाइऑक्साइड वर्षाजल में घुलती है, सिलिकेट चट्टानों के साथ प्रतिक्रिया करती है और आखिर कार महासागरों तथा अवसादों की ओर जाती है। ज्वालामुखी भूवैज्ञानिक समय-मान पर कार्बन डाइऑक्साइड वापस वायुमंडल में छोड़ते हैं। मिलकर ये प्रक्रियाएँ कार्बोनेट-सिलिकेट चक्र का हिस्सा हैं, जिसे अक्सर ग्रह का "थर्मोस्टैट" कहा जाता है।

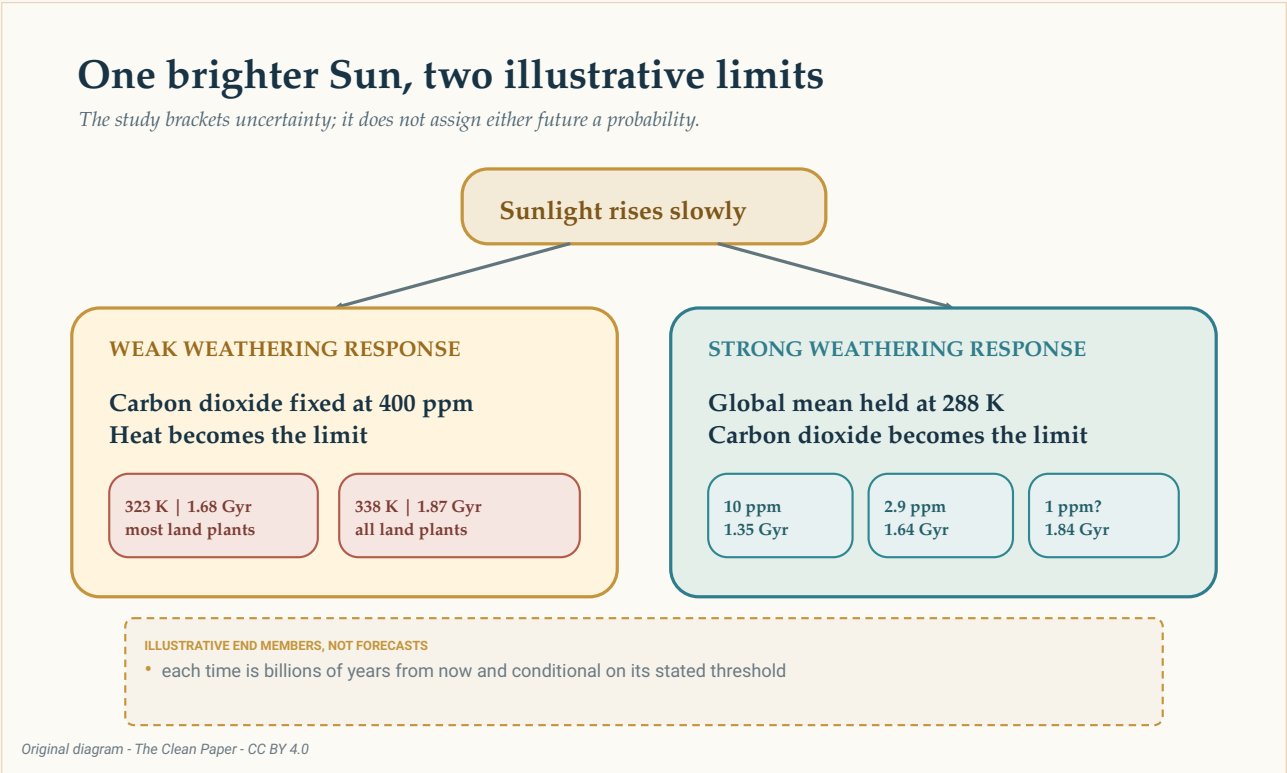
गरम और अधिक वर्षा वाली दुनिया में अपक्षय तेज हो सकता है और कार्बन डाइऑक्साइड अधिक तेजी से हटा सकता है। लेकिन वैज्ञानिक नहीं जानते कि भविष्य के अधिक चमकीले सूर्य के नीचे यह प्रतिक्रिया पृथ्वी की जलवायु को कितनी मजबूती से नियंत्रित करेगी। इसलिए Jacob Haqq-Misra और Eric Wolf ने किसी एक मार्ग को "सही" मानकर नहीं चुना। उन्होंने दो **सीमांत परिदृश्यों** का मॉडल बनाया, अनिश्चितता की सीमा समझने के लिए जानबूझकर चुने गए दो चरम मामले।

- **कमजोर-अपक्षय सीमांत परिदृश्य** में वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड प्रति दस लाख में 400 भाग पर बनी रहती है, जबकि अधिक चमकीला सूर्य तापमान बढ़ाता है।
- **मजबूत-अपक्षय सीमांत परिदृश्य** में वैश्विक औसत सतही तापमान 288 केल्विन, यानी लगभग 15 डिग्री सेल्सियस, पर बना रहता है, जबकि बढ़ते सूर्यप्रकाश के साथ कार्बन डाइऑक्साइड घटती जाती है।

दोनों में से कोई भी शाखा पृथ्वी का वास्तविक भविष्य होने का दावा नहीं करती। पहली पूछती है कि कार्बन डाइऑक्साइड ऊँची बनी रहे तो बढ़ती गरमी क्या करेगी। दूसरी पूछती है कि अपक्षय वैश्विक तापमान को आज के औसत के पास बनाए रखे तो कार्बन की कमी क्या करेगी।

अपक्षय थर्मोस्टैट की तरह कैसे काम कर सकता है?

यह उपमा फीडबैक समझाने के लिए है, किसी वास्तविक नियंत्रण-घुंडी के लिए नहीं। यदि गर्म जलवायु रासायनिक अपक्षय तेज करे, तो अधिक वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड घुले हुए पदार्थ, खनिजों और अवसादों में जा सकती है। इस ग्रीनहाउस गैस को हटाना शुरुआती गर्माहट के कुछ हिस्से का प्रतिरोध करता है। बहुत लंबे समय-मान पर ज्वालामुखीय गैस-उत्सर्जन कार्बन डाइऑक्साइड वापस लाता है।
इस शृंखला की हर कड़ी की तकत वर्षा, खुली चट्टान, अपरदन, जीव विज्ञान, प्लेट विवर्तनिकी और महासागरीय रसायन पर निर्भर करती है। इसलिए शोधपत्र इस "थर्मोस्टैट" को पूरी तरह ज्ञात मशीन मानने के बजाय उसकी संभावित सीमाओं को परखता है।



शोधपत्र अनिश्चित भविष्य को दो उदाहरणात्मक सीमांत परिदृश्यों से बाँधता है। अपक्षय की प्रतिक्रिया कम जोर होती तो बढ़ती गर्मी अपनाई गई स्थलीय-पौधा सीमा तक पहुँचती है। प्रतिक्रिया मजबूत होती तो गिरती कार्बन डाइऑक्साइड अपनाई गई प्रकाश-संश्लेषण सीमा तक पहुँचती है। ये शर्तों पर निर्भर मॉडल शाखाएँ हैं, संभावनाएँ या उलटी गिनती की तारीखें नहीं।

The Clean Paper CC BY 4.0

29 स्थिर मॉडल-दुनियाएँ, दो अरब वर्षों की फ़िल्म नहीं

शोधकर्ताओं ने ExoCAM, एक त्रि-आयामी वैश्विक जलवायु मॉडल, से अधिक सौर इनपुट और कम कार्बन डाइऑक्साइड के अलग-अलग संयोजनों पर **29 स्थिर-अवस्था जलवायु** निकालीं। हर मामला 70 मॉडल-वर्ष चला। यहाँ एक मॉडल-वर्ष स्थिर परिस्थितियों के नीचे एक अनुकरणित वर्ष की चक्र है: कृत्रिम जलवायु को स्थिर होने देने का गणनात्मक समय, पृथ्वी के भविष्य की साल-दर-साल भविष्यवाणी का एक कदम नहीं। जलवायु स्थिर होने के बाद अंतिम 20 वर्षों का औसत लिया गया।

ये 29 मामले अलग-अलग मॉडल-दुनियाएँ हैं। हर रन ग्रीड का एक बिंदु है, जो पूछता है: “इस चुनी हुई सूर्यप्रकाश और कार्बन-डाइऑक्साइड जोड़ी पर कौन-सी स्थिर जलवायु बनती है?” कम्प्यूटर ने आज की पृथ्वी से शुरू करके अगले दो अरब वर्षों तक वायुमंडल, चट्टानों, महासागरों और जीवों को लगातार विकसित नहीं किया। लेखकों ने पहले से निकाले गए इन बिंदुओं के बीच दो योजनाबद्ध अपक्षय मार्ग खींचे; बिंदुओं के बीच कारण-तत्व स्वयं अनुकरण नहीं किया गया।

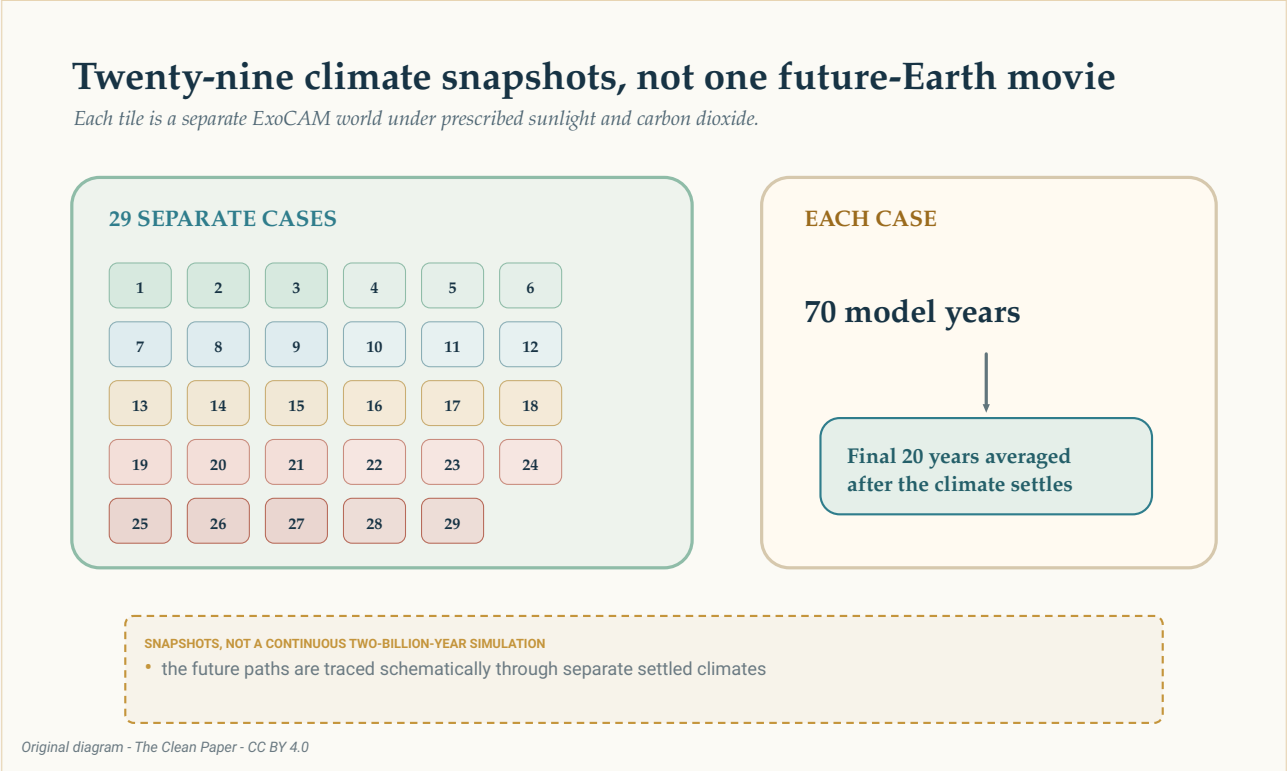
नीचे की तालिका आधिकारिक मॉडल-डेटा अभिलेख में दिए सूर्यप्रकाश और कार्बन-डाइऑक्साइड संयोजनों को दोहराती है। केस ID केवल पढ़ने में आसानी के लिए अभिलेख के क्रम में जोड़े गए हैं। **S/S0** सापेक्ष सौर स्थिरांक है: मॉडल में आने वाली सौर ऊर्जा को वर्तमान मान S0 से भाग दिया गया है। 1.2 का अर्थ आज की तुलना में 20 प्रतिशत अधिक आने वाली सौर ऊर्जा है। **CO2 (ppm)** हर दस लाख वायुमंडलीय अणुओं में कार्बन-डाइऑक्साइड अणुओं का अनुपात है।

केस 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

मॉडल की पृथ्वी पहचान में हमारी पृथ्वी जैसी है, लेकिन उसे जानबूझकर सीमित रखा गया है। उसका आकार पृथ्वी जितना है और वह वर्तमान भूगोल इस्तेमाल करती है। पूरी तरह परिसंचरित महासागर की जगह सरल स्लैब महासागर है, वायुमंडलीय दाब लगभग मौजूदा पृथ्वी के मान (एक बार) पर रखा गया है और मीथेन स्थिर है। कक्षा पूरी तरह वृत्ताकार है (शून्य विकेंद्रता) और घूर्णन-अक्ष में झुकाव नहीं है (शून्य अक्षीय झुकाव)। स्पष्ट मिट्टी, वनस्पति या बदलते जीवमंडल के फीडबैक

शामिल नहीं हैं। सबसे महत्वपूर्ण बात: जलवायु मॉडल गतिशील रूप से चट्टान-अपक्षय मॉडल से युग्मित नहीं है। दूसरे शब्दों में ExoCAM अपक्षय की गणना करके कार्बन डाइऑक्साइड को अद्यतन नहीं करता और फिर फीडबैक चक्र में अगला जलवायु रन नहीं चलाता। शोधकर्ताओं ने दो सीमित करने वाले मार्ग पहले से तय किए और उन्हें 29 मॉडलों वाले जलवायु ग्रिड के बीच खींचा।

> **जलवायु मॉडल में "स्थिर अवस्था" का क्या अर्थ है?**
>
> स्थिर-अवस्था मॉडल ऐसी जलवायु है जिसे चुने हुए सूर्यप्रकाश और वायुमंडल के नीचे स्थिर होने दिया गया है। सिमुलेशन के भीतर दिन-प्रतिदिन और साल-दर-साल मौसम बदलता रहता है, लेकिन दीर्घकाल की औसत में बड़ा बहाव रुक जाता है।
> यह पूछने के लिए उपयोगी है, "इन परिस्थितियों में कौन-सी जलवायु टिक सकती है?" यह उस भविष्यवाणी से अलग है कि वास्तविक पृथ्वी परिस्थितियों के एक समूह से अगले तक ठीक किस रास्ते से जाएगी।



हर खंड अलग ExoCAM जलवायु रन है जो 70 मॉडल-वर्ष चला और अंतिम 20 वर्षों का औसत लिया गया। अध्ययन ने निर्धारित सूर्यप्रकाश और कार्बन-डाइऑक्साइड परिस्थितियों पर 29 स्थिर जलवायु नमूने लिए; उसने दो अरब वर्षों तक लगातार विकसित होती एक ही पृथ्वी का अनुकरण नहीं किया।

The Clean Paper CC BY 4.0

सीमांत परिदृश्य एक: कार्बन डाइऑक्साइड पर्याप्त, गर्मी बहुत अधिक

कमज़ोर-अपक्षय शाखा में कार्बन डाइऑक्साइड प्रति दस लाख में 400 भाग पर स्थिर रहती है। सौर इनपुट बढ़ने पर गर्मी सीमित करने वाला कारक बनती है।

शोधपत्र पहले के काम से दो वैश्विक औसत तापमान सीमाएँ इस्तेमाल करता है:

- 323 **केल्विन**, वैश्विक वार्षिक औसत के रूप में लगभग 50 **डिग्रीसेल्सियस**, पर दुनिया को अधिकांश स्थलीय पौधों के लिए बहुत गर्म माना जाता है। मॉडल लगभग 1.68 **अरब वर्ष** में इस सीमा तक पहुँचता है।
- 338 **केल्विन**, वैश्विक वार्षिक औसत के रूप में लगभग 65 **डिग्रीसेल्सियस**, पर दुनिया को सभी स्थलीय पौधों के लिए बहुत गर्म माना जाता है। मॉडल लगभग 1.87 **अरब वर्ष** में इस सीमा तक पहुँचता है।

ये अपनाई गई जैविक सीमाएँ हैं, ऐसे सार्वभौमिक तापमान नहीं जहाँ हर प्रकाश-संश्लेषी जीव निश्चित रूप से विफल हो जाए। वैश्विक औसत बड़े क्षेत्रीय अंतर छिपाता है। अध्ययन यह भी देखता है कि तापमान और पानी के कौन-से संयोजन उपयुक्त रह सकते हैं, लेकिन जलवायु मानचित्र पर कोई लेबल भविष्य के हर संभावित आश्रय या अनुकूलन को सूचीबद्ध नहीं कर सकता।

सीमांत परिदृश्य दो तापमान सहनीय, कार्बन डाइऑक्साइड बहुत कम

मज़बूत-अपक्षय शाखा में वैश्विक औसत तापमान 288 केल्विन, यानी लगभग 15 डिग्रीसेल्सियस, पर स्थिर रहता है जबकि वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड गिरती है। यहाँ परिणाम इस पर निर्भर करता है कि अलग प्रकाश-संश्लेषी मार्ग कितने कम कार्बन पर काम कर सकते हैं।

- पारंपरिक **प्रति दस लाख में 10 भाग** की सीमा — हर दस लाख वायुमंडलीय अणुओं में 10 कार्बन-डाइऑक्साइड अणु — पर C4 प्रकाश-संश्लेषण की सीमा लगभग 1.35 **अरब वर्ष** में आती है। मक्का और गन्ने सहित कई पौधे C4 प्रकाश-संश्लेषण इस्तेमाल करते हैं; यह कार्बन बाँधने वाले एंज़ाइम के आसपास कार्बन डाइऑक्साइड को केंद्रित करता है।
- पहले के काम में चर्चा की गई वैकल्पिक **प्रति दस लाख में 2.9 भाग** की C4 सीमा इसे लगभग 1.64 **अरब वर्ष** तक ले जाती है।
- अस्थायी **प्रति दस लाख में 1 भाग** की सीमा जिसे कुछ CAM पौधों — क्रैसुलेसियन एसिड मेटाबॉलिज़्म इस्तेमाल करने वाले पौधे, जो कार्बन-डाइऑक्साइड ग्रहण को रात और उपयोग को दिन में अलग करते हैं — या घुले हुए बाइकार्बोनेट का इस्तेमाल करने वाले जलीय पौधों की संभावित टिकाऊ क्षमता से जोड़ा गया है, सीमा को लगभग 1.84 **अरब वर्ष** तक ले जाती है।

आखिरी संख्या पर सबसे बड़ी जैविक सावधानी लागू होती है। लेखक प्रति दस लाख में एक भाग की सीमा को स्पष्ट रूप से अस्थायी कहते हैं। यह भविष्य की पृथ्वी जैसी परिस्थितियों में सभी CAM पौधों या जलीय वनस्पति के लिए प्रयोगों से स्थापित जीवित रहने की सीमा नहीं है।

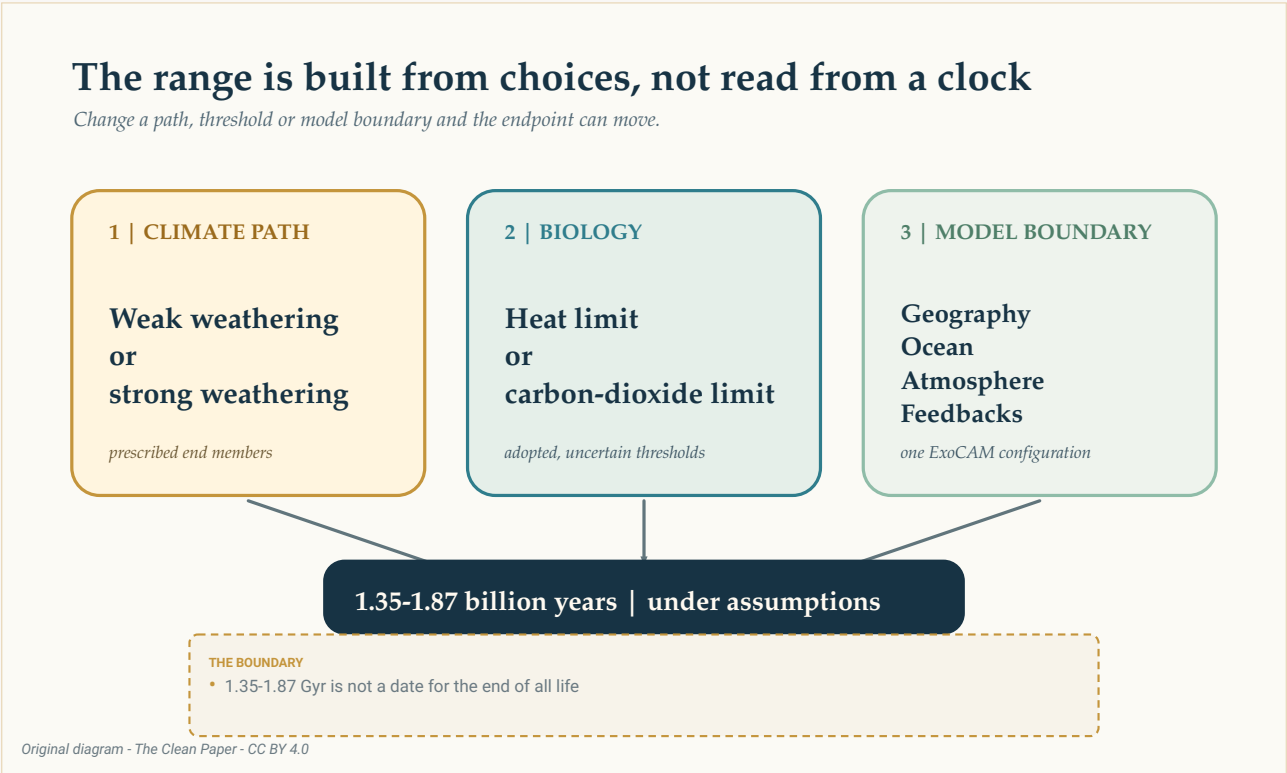
C3, C4 और CAM अलग रणनीतियाँहैं, कोई सीढ़ीनहीं

पौधे कार्बन ग्रहण करने के लिए अलग जैवरासायनिक रास्ते इस्तेमाल करते हैं। **C3 प्रकाश-संश्लेषण** सबसे सामान्य है। **C4 प्रकाश-संश्लेषण**, मक्काऔर गन्ने जैसे पौधोंमें, कार्बन बाँधने वाले एंज़ाइम के आसपास कार्बन डाइऑक्साइड कोकेंद्रित करताहै और कम कार्बन डाइऑक्साइड में बेहतर काम कर सकताहै। **क्रैसुलेसियिन एसिड मेटाबॉलिज़्म** (CAM) कार्बन ग्रहण और उपयोग कोरात तथादिन में अलग करताहै, जिससे कई पौधे पानीबचाते हैं। ये अनेक प्रजाति-स्तरीय अंतरोंवाले रणनीति-समूह हैं, "बेहतर" पौधोंकीक्रमिक सीढ़ियाँनहीं। शोधपत्र में बहुत कम कार्बन-डाइऑक्साइड कीसीमाएँ संभावित छोरोंकोपरखने के लिए रखीगई धारणाएँ हैं; इसकीकोई गारंटीनहींकि भविष्य के पारितंत्र उन्हें इस्तेमाल करने के लिए विकसित होंगे।

1.86 अरब वर्ष कोई अंतिम तारीख क्योंनहींहै

शोधपत्र काप्रमुख अनुमान, लगभग **1.86 अरब वर्ष**, दोआशावादीऊपरीअंतिम बिंदुओं काऔसत है: कार्बन-डाइऑक्साइड-सीमित शाखामें 1.84 अरब वर्ष और गर्मीसीमित शाखामें 1.87 अरब वर्ष। यह दोअलग परिदृश्योंकासंक्षिप्त सार है। यह अधिक सटीकतावालाकोई तीसरामॉडल-नतीजायाः"सबसे अच्छा" अनुमानित दिनांक नहींहै।

व्यापक 1.35 से 1.87 अरब वर्ष कादायराभीकोई एकल प्रायिकतावितरण नहींहै। निचलाऔर ऊपरीमान अलग अपक्षय धारणाओं, अलग जैविक सीमाओं और एक जलवायु-मॉडल विन्यास पर निर्भर करते हैं। यह दायरासमय के साथ-साथ मॉडल में किए गए चुनावोंकोभीदर्शाताहै।



1.35 से 1.87 अरब वर्ष कादायराअपक्षय मार्ग, जैविक सीमाऔर मॉडल कीसीमाएँ चुनने के बाद हीनिकलताहै। यह धारणाओं कानक्शा है, समस्त जीवन के विलुप्त होने तक उलटीगिनतीकरतीघड़ीनहीं।

The Clean Paper CC BY 4.0

दूसरी सीमाएँ पहले आ सकती हैं

वनस्पति-आधारित जीवमंडल के सबसे लंबे अनुमान एक दूसरी अनिश्चित सीमा के पास आते हैं: नम या अनियंत्रित ग्रीनहाउस अवस्था, जो बड़े पैमाने पर महासागरीय जल-हानि चला सकती है। बढ़ते सूर्यप्रकाश के नीचे ये अवस्थाएँ कब शुरू होंगी, खासकर वर्तमान परिस्थितियों से बहुत दूर, इस पर जलवायु मॉडल काफी असहमत हैं। कुछ अनुमान इन्हें सबसे आशावादी प्रकाश-संश्लेषण सीमा से पहले रखते हैं।

इसका अर्थ है कि ऊपरी शाखा को इस वादे की तरह नहीं पढ़ा जा सकता कि पृथ्वी 1.87 अरब वर्ष तक महासागर, परिचित महाद्वीप या रहने योग्य सतही परिस्थितियाँ बनाए रखेगी। मॉडल भविष्य की प्लेट विवर्तनिकी, स्थलीय क्षेत्रफल में बदलाव, विकिरित होते पारितंत्र या पूरी तरह गतिशील महासागर को भी शामिल नहीं करता। वायुमंडल ऊर्जा को कैसे अवशोषित और उत्सर्जित करता है, उसकी गणनाओं को भी तीव्र सूर्यप्रकाश और अत्यंत कम कार्बन डाइऑक्साइड वाले क्षेत्रों तक बढ़ाया जा रहा है, जहाँ मॉडल एक-दूसरे से अलग होने लगते हैं।

विकास वादी अनुकूलन और तकनीकी हस्तक्षेप शोधपत्र की चर्चा में संभावनाएँ हैं। वे 29 जलवायु सिमुलेशनों के नतीजे नहीं हैं। मॉडल भविष्य के जीवों को प्रति दस लाख में एक भाग वाली प्रकाश-संश्लेषी सीमा के अनुकूल विकसित होते नहीं दिखाता, न किसी सभ्यता को अरबों वर्षों तक वायुमंडल का प्रबंधन करते।

यह आज के जलवायु संकट के बारे में निष्कर्ष नहीं है

सूर्य की चमक में बढ़ोतरी करोड़ों से अरबों वर्षों के पैमाने पर काम करती है। आधुनिक मानव-जनित ग्रीनहाउस गैसों से आती है। दोनों अलग प्रेरक प्रभाव हैं, बिल्कुल अलग समय-मान पर, और अलग सवालों के जवाब हैं।

इस अध्ययन में कुछ भी मौजूदा जलवायु परिवर्तन के साक्ष्य को कमजोर नहीं करता और न कार्रवाई टालने का कोई तर्क देता है। दूर के मॉडल-परिदृश्य में कुछ प्रकाश-संश्लेषी जीवन बनाए रख सकने वाला जीवमंडल उस जलवायु के समान नहीं है जिसमें आज के समाज और पारितंत्र सुरक्षित रह सकें।

शोधपत्र का मूल्य यह है कि वह बहुत दूर के सवाल को अधिक व्यवस्थित बनाता है। यह दिखाता है कि पहले के सरल मॉडल, सूर्यप्रकाश बढ़ने पर कार्बन डाइऑक्साइड को स्थिर रखकर, शायद बहुत अधिक गर्माहट दिखाते थे; और प्रकाश-संश्लेषी जीवन के पास किसी एक मानक कार्बन सीमा से आगे टिके रहने के रास्ते हो सकते हैं। साथ ही यह भी दिखाता है कि अरब वर्ष का हर अतिरिक्त अंश धारणाओं की पूरी शृंखला के साथ आता है।

पत्ते को ऊर्जा देने वाला सूर्य धीरे-धीरे बदल रहा है। पृथ्वी 1.35, 1.87 या किसी दूसरी संख्या में अरब वर्षों तक हरी रहती है या नहीं, यह चट्टानों, पानी, वायुमंडल और जीवन की परस्पर जुड़ी प्रतिक्रियाओं पर निर्भर करेगा। ईमानदार नतीजा कोई तारीख नहीं है। यह उस लंबे समझौते की अधिक व्यापक तस्वीर है।

साफ सारांश

यह त्रि-आयामी जलवायु अध्ययन पूछता है कि सूर्य के धीरे-धीरे अधिक चमकीला होने पर पृथ्वी का वनस्पति-आधारित — यानी प्रकाश-संश्लेषी— जीवमंडल कितने समय टिक सकता है। शोधकर्ताओं ने 29 अलग स्थिर-अवस्था जलवायु की गणना की और उनके बीच दो उदाहरणात्मक सीमांत परिदृश्य खींचे। कमजोर अपक्षय और कार्बन डाइऑक्साइड को प्रति दस लाख में 400 भाग पर स्थिर रखने पर स्थलीय पौधों के लिए अपनाई गई गर्मी की सीमाएँ आज से लगभग 1.68 और 1.87 अरब

वर्ष में आती हैं। मज़बूत अपक्षय और वैश्विक औसत तापमान को 288 केल्विन, यानी लगभग 15 डिग्री सेल्सियस, पर स्थिर रखने पर प्रकाश-संश्लेषण के लिए अपनाई गई कार्बन-डाइऑक्साइड सीमाएँ लगभग 1.35, 1.64 और अस्थायी सीमा के साथ 1.84 अरब वर्ष में आती हैं। अक्सर उद्धृत 1.86 अरब वर्ष केवल दो आशावादी ऊपरी अंतिम बिंदुओं का गोल किया हुआ औसत है। ये परिदृश्य-निर्भर मॉडल-दायरे हैं — पृथ्वी, मानवता या सभी जीवन के अंत की तारीख नहीं। मॉडल निर्धारित मार्ग, वर्तमान भूगोल, स्लैब महासागर और स्पष्ट मिट्टी-वनस्पति या जलवायु–अपक्षय युग्मन के बिना चलता है, और सबसे लंबे अनुमान अनिश्चित ग्रीनहाउस/महासागर-हानि सीमाओं के करीब पहुँचते हैं।

बिना बढ़ा-चढ़ाकर जाँच

शोधपत्र क्या दिखाता है: इस ExoCAM विन्यास में बढ़ते सूर्यप्रकाश और स्थिर कार्बन डाइऑक्साइड के तहत त्रि-आयामी जलवायु, तुलना में इस्तेमाल सरल मॉडल की अपेक्षा समान्यतः कम गर्म होती है। दोनों निर्धारित अपक्षय सीमांत परिदृश्यों और कई अपनाई गई जैविक सीमाओं में वनस्पति-आधारित जीवमंडल की सीमा आज से लगभग 1.35 से 1.87 अरब वर्ष के बीच आती है।

क्या संभव है लेकिन स्थापित नहीं: कुछ CAM पौधे या घुले हुए बाइकार्बोनेट का इस्तेमाल करने वाले जलीय पौधे लगभग प्रति दस लाख में एक भाग वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड पर प्रकाश-संश्लेषण बनाए रख सकते हैं; अनुकूलन या तकनीकी प्रकाश-संश्लेषी जीवन को और आगे बढ़ा सकती है; और वास्तविक जलवायु-अपक्षय मार्ग दो मॉडल सीमांत परिदृश्यों के बीच रह सकता है।

यह क्या नहीं दिखाता: सभी पौधों, सभी जीवन, मानव सभ्यता, पृथ्वी के महासागरों या ग्रह के अंत की कोई तय तारीख; अगले दो अरब वर्षों की एक लगातार चलने वाली सिमुलेशन; या मौजूदा मानव-जनित जलवायु परिवर्तन को कम गंभीर मानने का कोई कारण।

मुख्य सीमाएँ: एक जलवायु-मॉडल परिवार के 29 स्थिर-अवस्था मामले; गतिशील रूप से युग्मित होने की जगह पहले से निर्धारित अपक्षय मार्ग; वर्तमान भूगोल; स्लैब महासागर; स्थिर मीथेन; शून्य अक्षीय झुकाव/विकेंद्रता; स्पष्ट मिट्टी, वनस्पति या जीवमंडलीय फीडबैक का अभाव; अनिश्चित गर्मी/कार्बन-डाइऑक्साइड सीमाएँ; और नम/अनियंत्रित ग्रीनहाउस परिस्थितियों के पास मॉडलों में बड़ा मतभेद।

सामान्य पाठक को कितना भरोसा रखना चाहिए? अध्ययन संभावित मॉडल-दायरे को व्यापक करता है और परिणाम को नियंत्रित करने वाली धारणाओं की पहचान करता है — इसमें उच्च भरोसा। इस मॉडल के भीतर संख्यात्मक दायरा उपयोगी है — इसमें मध्यम भरोसा। किसी सटीक तारीख में भरोसा कम होना चाहिए, क्योंकि दूर के अंतिम बिंदु जानबूझकर चुने गए चरम जलवायु मार्गों और अनिश्चित जीववैज्ञानिक पर निर्भर करते हैं।

स्रोत

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