The Clean Paper

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

Як доўга Зямля можа заставацца зялёнай? Кліматычная мадэль дае дыяпазоны, а не дату канца свету

Дваццаць дзевяць трохмерных кліматычных сімуляцый размяшчаюць розныя межы для фотасінтэтычнай біясферы Зямлі прыкладна паміж 1,35 і 1,87 мільярда гадоў ад сёння. Значэнні залежаць ад наўмысна спрошчаных шляхоў выветрывання парод, спёкі і найніжэйшых узроўняў вуглякіслага газу, якія могуць выкарыстоўваць расліны. Яны не прадказваюць, калі скончацца ўсе расліны, усё жыццё, цывілізацыя або сама планета.

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 доўга Зямля можа заставацца зялёнай? Кліматычная мадэль дае дыяпазоны, а не дату канца свету

Ліст існуе ў межах вузкага кампрамісу. Яму патрэбныя святло, вада, вуглякіслы газ і тэмпература, якую можа вытрымаць яго хімія. На працягу чалавечага жыцця Сонца здаецца нязменнай часткай гэтага кампрамісу. На працягу мільярда гадоў — ужо не.

Старэючы на галоўнай паслядоўнасці, Сонца павольна становіцца ярчэйшым. Больш сонечнага святла награвае Зямлю, але планета мае доўгатэрміновы адказ: рэакцыі паміж дажджавой вадой, вуглякіслым газам і сілікатнымі пародамі могуць выдаляць вуглякіслы газ з атмасферы. Гэта аслабляе парніковы эфект і кампенсуе частку пацяплення. Але той самы адказ, які астуджае планету, у рэшце рэшт можа пазбавіць фотасінтэзуючыя арганізмы вугляроду, з якога яны будуюць жывую тканку.

Новая праца ў Journal of Geophysical Research: Atmospheres пытаецца, якое абмежаванне можа наступіць раней: занадта моцная спёка ці занадта мала вуглякіслага газу. Яе адказ — не дата смерці Зямлі. У двух наўмысна спрошчаных сцэнарыях будучыні прынятыя межы для фотасінтэтычнага жыцця прыпадаюць прыкладна на **1,35–1,87 мільярда гадоў ад сёння**.

Гэты дыяпазон датычыць **расліннай біясферы** — часткі жывой сістэмы Зямлі, якую падтрымліваюць фотасінтэзуючыя арганізмы, асабліва расліны і іншыя формы жыцця, што ператвараюць святло і вуглякіслы газ у біялагічны матэрыял. Гэта не прагноз для кожнага мікроба. Не тэрмін існавання чалавечай цывілізацыі. І не тэрмін жыцця планеты.

Планетарны тэрмастат мае дзве нявызначаныя налады

Галоўная нявызначанасць — **сілікатнае выветрыванне**. Вуглякіслы газ раствараецца ў дажджавой вадзе, рэагуе з сілікатнымі пародамі і ўрэшце пераносіцца ў акіяны і адклады. На геалагічных маштабах часу вулканы вяртаюць вуглякіслы газ. Разам гэтыя працэсы ўтвараюць частку карбанатна-сілікатнага цыклу, які часта апісваюць як планетарны тэрмастат.

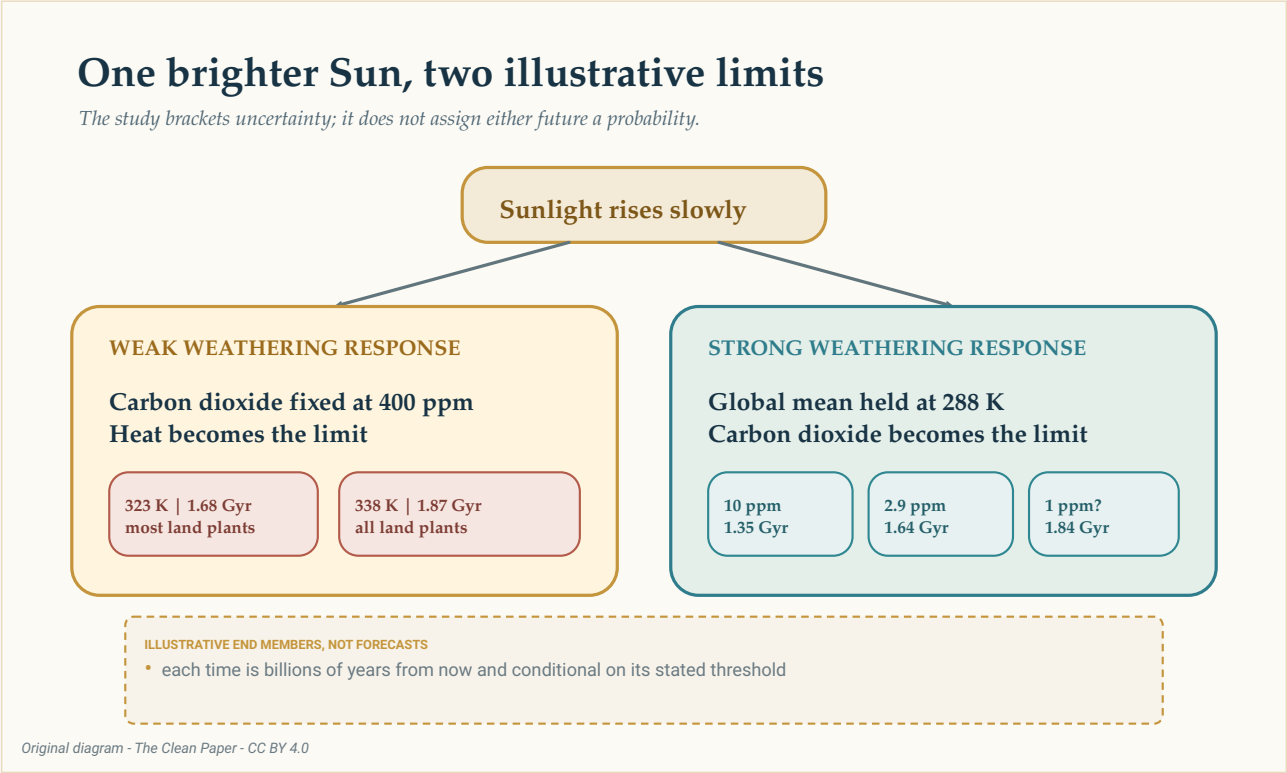
У больш цёплым і вільготным свеце выветрыванне можа паскарацца і хутчэй выдаляць вуглякіслы газ. Але навукоўцы не ведаюць, наколькі моцна гэты адказ будзе кіраваць Зямлёй пад ярчэйшым будучым Сонцам. Таму Джэйкаб Хак-Місра і Эрык Вулф не выбралі адзін нібыта правільны шлях. Яны змадэлявалі два **крайнія сцэнарыі** — наўмысна крайнія выпадкі, якія акрэсліваюць нявызначанасць.

- У сцэнарыі **слабога выветрывання** канцэнтрацыя вуглякіслага газу ў атмасферы застаецца на ўзроўні 400 частак на мільён, а ярчэйшае Сонца павышае тэмпературу.
- У сцэнарыі **моцнага выветрывання** сярэдняя глабальная тэмпература паверхні

застаецца 288 кельвінаў, каля 15 градусаў Цэльсія, а канцэнтрацыя вуглякіслага газу зніжаецца па меры росту сонечнага выпраменьвання.

Ніводная галіна не падаецца як сапраўдная будучыня Зямлі. Першая пытаецца, што зробіць спёка, калі вуглякіслага газу застанецца шмат. Другая — што зробіць вугляроднае галаданне, калі выветрыванне ўтрымае сярэднюю глабальную тэмпературу каля сённяшняй.

> **Як выветрыванне можа дзейнічаць як тэрмастат?**
>
> Гэта аналогія зваротнай сувязі, а не літаральная ручка кіравання. Калі цяплейшы клімат паскарае хімічнае выветрыванне, больш атмасфернага вуглякіслага газу можа перайсці ў раствораныя рэчывы, мінералы і адклады. Выдаленне гэтага парніковага газу супрацьдзейнічае частцы першапачатковага пацяплення. На вельмі доўгіх часавых маштабах вулканічная дэгазацыя вяртае вуглякіслы газ. Сіла кожнага звяна залежыць ад ападкаў, адкрытых парод, эрозіі, біялогіі, тэктонікі і хіміі акіяна. Таму праца правярае крайнія варыянты адказу, а не разглядае тэрмастат як добра вядомую машыну.



Праца акрэслівае нявызначаную будучыню двума ілюстрацыйнымі крайнімі сцэнарыямі. Калі выветрыванне рэагуе слаба, рост тэмпературы дасягае прынятых межаў для наземных раслін. Калі яно рэагуе моцна, падзенне вуглякіслага газу дасягае прынятых межаў фотасінтэзу. Гэта ўмоўныя галіны мадэлі, а не імавернасці або даты зваротнага адліку.

The Clean Paper CC BY 4.0

Дваццаць дзевяць усталяваных мадэльных светаў, а не адзін двухмільярдны фільм

Даследчыкі выкарысталі ExoCAM, трохмерную глабальную кліматычную мадэль, каб разлічыць **29 стацыянарных кліматаў** для розных спалучэнняў больш моцнага сонечнага выпраменьвання і меншай канцэнтрацыі вуглякіслага газу. Кожны выпадак мадэлявалі 70 мадэльных гадоў. Тут адзін мадэльны год — адзін змадэляваны гадавы цыкл пры фіксаваных умовах: гэта час разліку, неабходны штучнаму клімату для ўсталявання, а не адзін крок у пагадавым прагнозе будучыні Зямлі. Пасля таго як змадэляваны клімат паспеў усталявацца, даследчыкі асераднялі апошнія 20 гадоў.

Гэтыя 29 выпадкаў — асобныя мадэльныя светы. Кожны запуск — адна кропка ў сетцы, якая адказвае на пытанне: «які ўсталяваны клімат адпавядае гэтай выбранай пары сонечнага выпраменьвання і вуглякіслага газу?» Камп'ютар не пачынаў з сённяшняй Зямлі і не эвалюцыянаваў бесперапынна яе атмасферу, пароды, акіяны і жывых істот цягам наступных двух мільярдаў гадоў. Замест гэтага аўтары правялі два схематычныя шляхі выветрывання праз загадзя разлічаныя кропкі; сам шлях паміж кропкамі не мадэляваўся.

Табліца ўзнаўляе спалучэнні сонечнага выпраменьвання і вуглякіслага газу з афіцыйнага архіва мадэльных даных. Нумары выпадкаў дададзены тут для зручнасці чытання ў парадку архіва. **S/S0** — адносная сонечная пастаянная: уваходная сонечная энергія ў мадэлі, падзеленая на яе сённяшняе значэнне S0. Значэнне 1,2 таму азначае на 20% больш уваходнай сонечнай энергіі, чым сёння. **CO2 (ppm)** — доля вуглякіслага газу ў атмасферы ў малекулах на мільён атмасферных малекул.

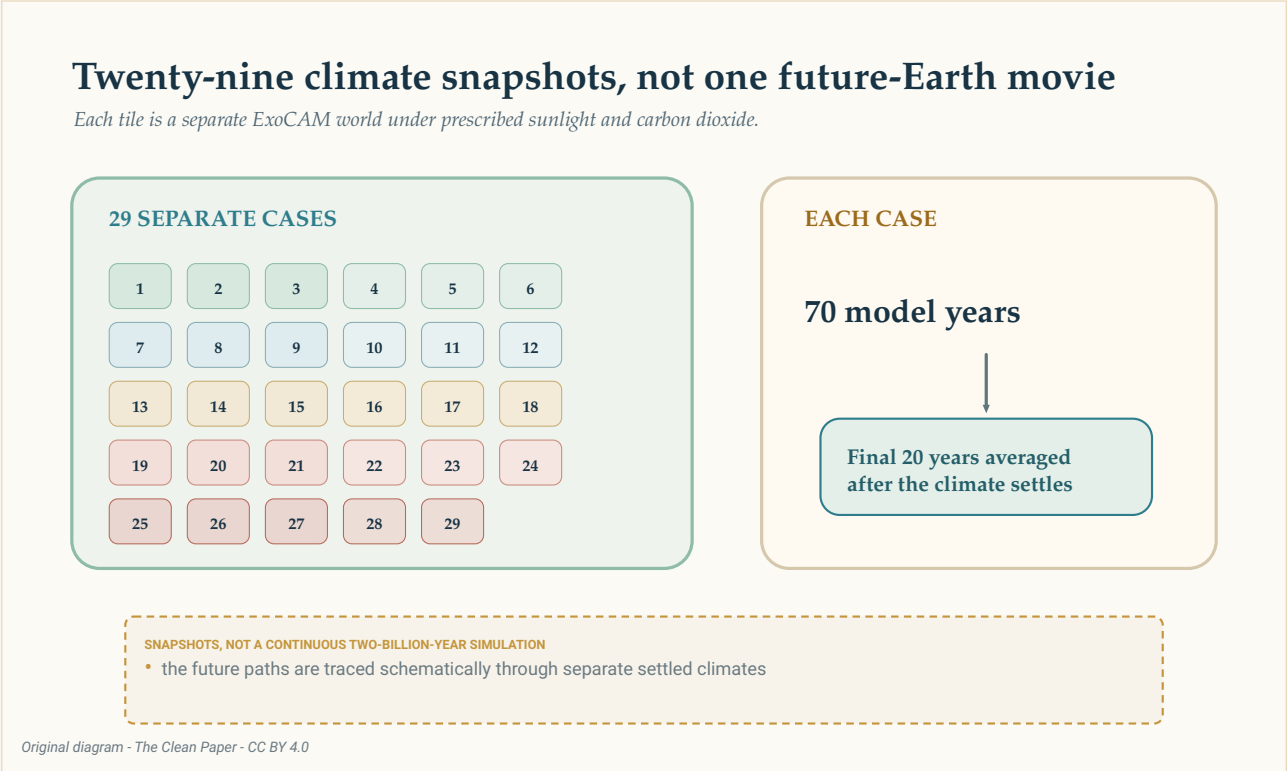
Нумар выпадку	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625

Нумар выпадку	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

Мадэльная Зямля пазнавальная, але наўмысна абмежаваная. Яна мае памер Зямлі і выкарыстоўвае сучасную геаграфію. У ёй ёсць спрошчаны акіян у выглядзе змешанага пласта замест акіяна з поўнай цыркуляцыяй, атмасферны ціск зададзены прыкладна на сучасным зямным узроўні — адзін бар, а метан фіксаваны. Арбіта ідэальна кругавая — эксцэнтрысітэт роўны нулю, а вось кручэння не мае нахілу — нахіл таксама нулявы. Мадэль не ўключае відавочна зададзеныя глебы, расліннасць або зваротную сувязь ад зменлівай біясферы. Найважнейшае: кліматычная мадэль дынамічна не звязана з мадэллю выветрывання парод. Іншымі словамі, ExoCAM не разлічвае выветрыванне, не абнаўляе паводле яго канцэнтрацыю вуглякіслага газу і не запускае наступны клімат у цыкле зваротнай сувязі. Даследчыкі замест гэтага задалі два крайнія шляхі і правялі іх праз сетку з 29 кліматычных выпадкаў.

Што азначае «стацыянарны стан» у кліматычнай мадэлі?

Выпадак стацыянарнага стану — гэта мадэльны клімат, якому дазволілі ўсталявацца пры адным выбраным Сонцы і адной атмасферы. Надвор’е ў сімуляцыі ўсё яшчэ змяняецца з дня на дзень і з года ў год, але яго доўгатэрміновыя сярэднія перастаюць моцна дрэйфаваць.
Гэта карысна для пытання «які клімат адпавядае гэтым умовам?». Але гэта не тое самае, што прадказаць дакладны шлях, па якім рэальная Зямля пераходзіць ад аднаго набору ўмоў да наступнага.



Кожная плітка — асобны запуск кліматычнай мадэлі ExoCAM на 70 мадэльных гадоў, з асерадненнем апошніх 20 гадоў. Даследаванне выбрала 29 усталяваных кліматаў пры зададзеных умовах сонечнага выпраменьвання і вуглякіслага газу; яно не мадэлявала адну Зямлю, што бесперапынна эвалюцыяную два мільярды гадоў.

The Clean Paper CC BY 4.0

Крайні сцэнарый першы: вуглякіслага газу дастаткова, але занадта горача

У галіне слабога выветрывання вуглякіслы газ застаецца фіксаваным на ўзроўні 400 частак на мільён. Па меры росту сонечнага патоку абмежавальным фактарам становіцца спёка.

Праца выкарыстоўвае дзве межы сярэдняй глабальнай тэмпературы з ранейшых даследаванняў:

- Пры **323 кельвінах**, каля **50 градусаў Цэльсія** ў сярэднім за год па ўсёй планеце, свет лічыцца занадта гарачым для большасці наземных раслін. Мадэль дасягае гэтай мяжы прыкладна праз **1,68 мільярда гадоў**.
- Пры **338 кельвінах**, каля **65 градусаў Цэльсія** ў сярэднім за год па ўсёй планеце, свет лічыцца занадта гарачым для ўсіх наземных раслін. Мадэль дасягае гэтай мяжы прыкладна праз **1,87 мільярда гадоў**.

Гэта прынятыя біялагічныя межы, а не ўніверсальныя тэмпературы, пры якіх абавязкова гіне кожны фотасінтэзуючы арганізм. Глабальная сярэдняя таксама хавае вялікія рэгіянальныя адрозненні. Даследаванне асобна разглядае, дзе спалучэнні тэмпературы і вады могуць заставацца прыдатнымі, але пазнака на кліматычнай карце не можа пералічыць усе будучыя сховішчы або адаптацыі.

Крайні сцэнарый другі: тэмпература прымальная, але вуглякіслага газу занадта мала

У галіне моцнага выветрывання сярэдняя глабальная тэмпература ўтрымліваецца на 288 кельвінах, каля 15 градусаў Цэльсія, а атмасферны вуглякіслы газ падае. Тут адказ залежыць ад таго, наколькі малую колькасць вугляроду могуць выкарыстоўваць розныя шляхі фотасінтэзу.

- Пры традыцыйнай мяжы **10 частак на мільён** — 10 малекул вуглякіслага газу на кожны мільён атмасферных малекул — мяжа для C4-фотасінтэзу наступае прыкладна праз **1,35 мільярда гадоў**. C4-фотасінтэз выкарыстоўваюць, сярод іншага, кукуруза і цукровы трыснёг; ён канцэнтруе вуглякіслы газ вакол ферменту, які яго фіксуе.
- Альтэрнатыўная мяжа C4 у **2,9 часткі на мільён**, абмеркаваная ў ранейшых працах, пераносіць яе прыкладна на **1,64 мільярда гадоў**.
- Папярэдняя мяжа ў **1 частку на мільён**, звязаная з магчымым захаваннем некаторых CAM-раслін — раслін з кіслотным метабалізмам таўсцянкавых, які раздзяляе паглынанне вуглякіслага газу ўначы і яго выкарыстанне ўдзень, — або водных раслін, здольных выкарыстоўваць раствораны гідракарбанат, пераносіць яе прыкладна на **1,84 мільярда гадоў**.

Апошняя лічба мае самую вялікую біялагічную агаворку. Аўтары адкрыта называюць мяжу ў адну частку на мільён папярэдняй. Гэта не эксперыментальна ўстаноўленая мяжа выжывання для ўсіх CAM-раслін або воднай расліннасці ва ўмовах будучай Зямлі.

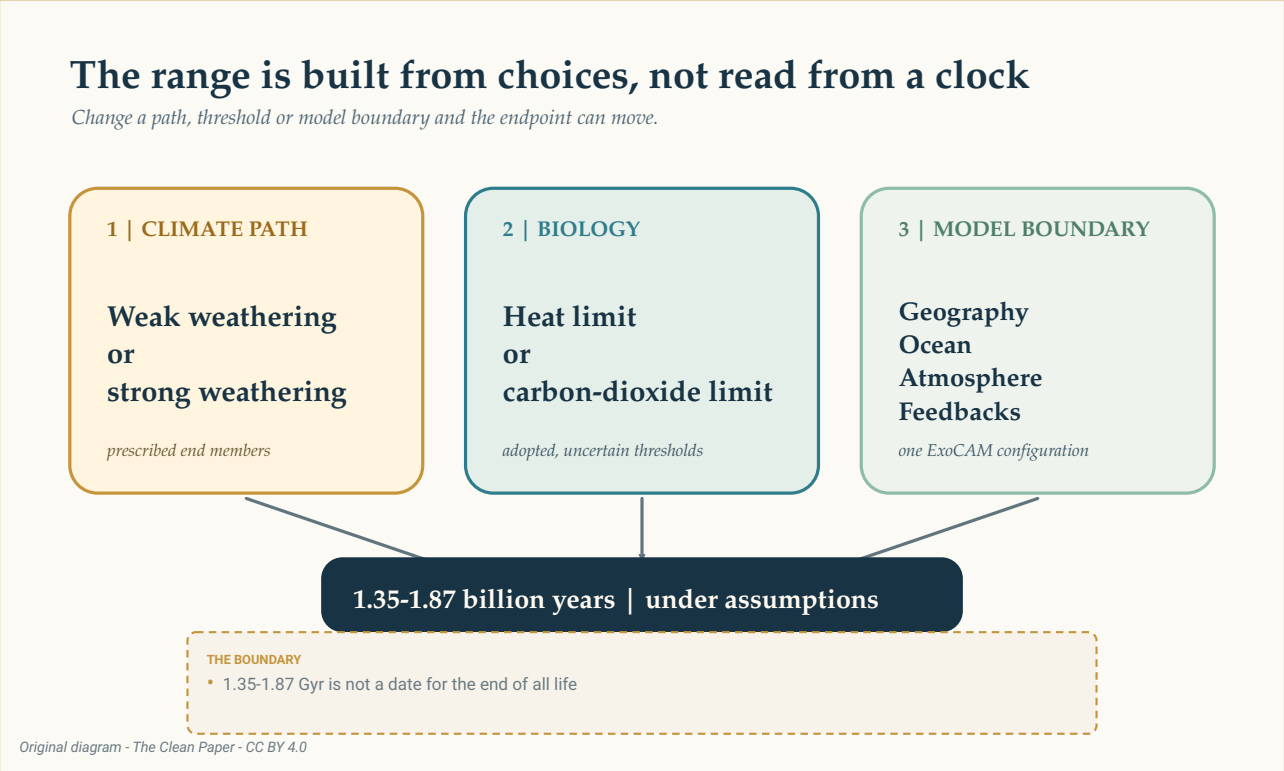
> **C3, C4 і CAM — стратэгіі, а не лесвіца**
>
> Расліны выкарыстоўваюць розныя біяхімічныя шляхі захопу вугляроду. **C3-фотасінтэз** найбольш распаўсюджаны. **C4-фотасінтэз**, якім карыстаюцца, у прыватнасці, кукуруза і цукровы трыснёг, канцэнтруе вуглякіслы газ вакол ферменту фіксацыі вугляроду і можа лепш працаваць пры яго дэфіцыце. **Кіслотны метабалізм таўсцянкавых (CAM)** раздзяляе паглынанне і выкарыстанне вугляроду паміж ноччу і днём, дапамагаючы многім раслінам эканоміць ваду.
> Гэта сямействы стратэгій з мноствам адрозненняў паміж відамі, а не паслядоўныя

> рангі «лепшых» раслін. Вельмі нізкія межы вуглякіслага газу ў працы — дапушчэнні для вывучэння магчымых абмежаванняў, а не гарантыя, што будучая экасістэма эвалюцыянуе да іх выкарыстання.

Чаму 1,86 мільярда гадоў — не тэрмін прыдатнасці

Загалоўкавая ацэнка працы — каля **1,86 мільярда гадоў** — з'яўляецца сярэднім двух аптымістычных верхніх канцоў: 1,84 мільярда гадоў у галіне, абмежаванай вуглякіслым газам, і 1,87 мільярда гадоў у галіне, абмежаванай спёкай. Гэта кароткае абагульненне двух розных сцэнарыяў. Яно не з'яўляецца трэцім вынікам мадэлі з большай дакладнасцю і не з'яўляецца найлепшай ацэнкай даты.

Нават шырэйшы дыяпазон 1,35–1,87 мільярда гадоў не мае адной імавернасці. Яго ніжняя і верхняя межы залежаць ад розных дапушчэнняў пра выветрыванне, розных біялагічных парогаў і адной канфігурацыі кліматычнай мадэлі. Дыяпазон вымярае выбары ў эксперыменце не менш, чым час.



Дыяпазон 1,35–1,87 мільярда гадоў узнікае толькі пасля выбару шляху выветрывання, біялагічнага парога і межаў мадэлі. Гэта карта дапушчэнняў, а не гадзіннік да вымірання ўсяго жыцця.

The Clean Paper CC BY 4.0

Іншыя межы могуць наступіць раней

Найдаўжэйшыя ацэнкі для расліннай біясферы набліжаюцца да асобнай і нявызначанай мяжы: вільготнага або некіравальнага парніковага эфекту, які можа прывесці да значнай страты акіянаў. Кліматычныя мадэлі моцна разыходзяцца ў тым, калі пачынаюцца такія станы пры росту сонечнага выпраменьвання, асабліва далёка ад сучасных умоў. Некаторыя ацэнкі ставяць іх раней за найбольш аптымістычную мяжу фотасінтэзу.

Таму верхнюю галіну нельга чытаць як абяцанне, што Зямля захавае акіяны, знаёмыя кантыненты або прыдатныя для жыцця паверхневыя ўмовы да 1,87 мільярда гадоў ад сёння. Мадэль таксама не ўключае будучую тэктоніку пліт, змены плошчы сушы, эвалюцыю экасістэм або цалкам дынамічны акіян. Яе разлікі паглынання і выпраменьвання энергіі атмасферай таксама распаўсюджваюцца на рэжымы інтэнсіўнага сонечнага выпраменьвання і надзвычай нізкага вуглякіслага газу, дзе розныя мадэлі разыходзяцца.

Эвалюцыйная адаптацыя і тэхналагічнае ўмяшанне згадваюцца ў абмеркаванні працы як магчымасці. Яны не з’яўляюцца вынікамі 29 кліматычных сімуляцый. Мадэль не паказвае, як будучыя арганізмы эвалюцыянуюць да фотасінтэзу пры адной частцы на мільён, і не паказвае цывілізацыю, якая кіруе атмасферай мільярд гадоў.

Гэта не вынік пра сучасны кліматычны крызіс

Павелічэнне яркасці Сонца дзейнічае на працягу сотняў мільёнаў і мільярдаў гадоў. Сучаснае пацяпленне, выкліканае чалавекам, паходзіць ад хуткага росту парніковых газаў на працягу дзесяцігоддзяў і стагоддзяў. Гэта розныя прымусовыя ўздзеянні на радыкальна розных часавых маштабах, якія адказваюць на розныя пытанні.

Нішто ў гэтым даследаванні не аслабляе доказаў сучаснай змены клімату і не дае падставы адкладаць дзеянні. Біясфера, якая можа захаваць некаторыя формы фотасінтэтычнага жыцця ў адным далёкім мадэльным сцэнарыі, — не тое самае, што клімат, у якім сённяшнія грамадствы і экасістэмы застаюцца ў бяспецы.

Праца каштоўная, бо робіць далёкае пытанне больш дысцыплінаваным. Яна паказвае, што ранейшыя, прасцейшыя мадэлі маглі пераацэньваць пацяпленне, калі сонечнае выпраменьванне расло, а вуглякіслы газ заставаўся фіксаваным, і што фотасінтэтычнае жыццё можа мець больш шляхоў да захавання, чым мяркуе адзін кананічны парог вугляроду. Яна таксама паказвае, чаму кожная дадатковая доля мільярда гадоў прыходзіць разам з ланцугом дапушчэнняў.

Сонца, якое корміць ліст, павольна змяняецца. Ці застанецца Зямля зялёнай яшчэ 1,35, 1,87 або іншую колькасць мільярдаў гадоў, будзе залежаць ад сумеснага адказу парод, вады, атмасферы і жыцця. Сумленны вынік — не дата, а шырэйшае разуменне гэтага кампрамісу.

Кароткі вынік

Трохмернае кліматычнае даследаванне пытаецца, як доўга можа існаваць раслінная — фотасінтэтычная — біясфера Зямлі па меры павольнага павелічэння яркасці Сонца. Даследчыкі разлічылі 29 асобных стацыянарных кліматаў і правялі праз іх два ілюстрацыйныя крайнія сцэнарыі. Пры слабым выветрыванні і фіксаванай канцэнтрацыі вуглякіслага газу 400 частак на мільён прынятыя цеплавыя межы для наземных раслін наступаюць прыкладна праз 1,68 і 1,87 мільярда гадоў. Пры моцным выветрыванні і фіксаванай сярэдняй глабальнай тэмпературы 288 кельвінаў, каля 15 градусаў Цэльсія, прынятыя межы вуглякіслага газу для фотасінтэзу наступаюць прыкладна праз 1,35, 1,64 і — пры выкарыстанні папярэдняга парога — 1,84 мільярда гадоў. Часта цытаваныя 1,86 мільярда гадоў — толькі акругленае сярэдняе двух аптымістычных верхніх канцоў. Гэта залежныя ад сцэнарыяў мадэльныя дыяпазоны, а не дата канца Зямлі, чалавецтва або ўсяго жыцця. Мадэль выкарыстоўвае зададзеныя шляхі, сучасную геаграфію, спрошчаны акіян і не мае відавочнай сувязі глебы з расліннасцю або клімату з выветрываннем; найдаўжэйшыя ацэнкі набліжаюцца да нявызначаных межаў парніковага эфекту і страты акіяна.

Праверка без сенсацый

Што паказвае праца: у гэтай канфігурацыі ExoCAM трохмерныя кліматы пры росту сонечнага выпраменьвання і фіксаваным вуглякіслым газе звычайна награваюцца менш, чым спрошчаныя мадэлі, выкарыстаныя для параўнання. Пры двух зададзеных крайніх сцэнарыях выветрывання і некалькіх прынятых біялагічных парогах межы для расліннай біясферы прыпадаюць прыкладна на 1,35–1,87 мільярда гадоў ад сёння.

Што праўдападобна, але не ўстаноўлена: што некаторыя CAM-расліны або водныя расліны, якія выкарыстоўваюць раствораны гідракарбанат, могуць падтрымліваць фотасінтэз пры прыкладна адной частцы вуглякіслага газу на мільён; што адаптацыя або тэхналогіі могуць падоўжыць фотасінтэтычнае жыццё; і што сапраўдны шлях клімату і выветрывання застанецца паміж двума крайнімі сцэнарыямі.

Чаго праца не паказвае: фіксаванай даты канца ўсіх раслін, усяго жыцця, чалавечай цывілізацыі, акіянаў Зямлі або самой планеты; адной бесперапыннай сімуляцыі наступных двух мільярдаў гадоў; або любой прычыны недаацэньваць сучасную змену клімату, выкліканую чалавекам.

Галоўныя абмежаванні: 29 стацыянарных выпадкаў з аднаго сямейства кліматычных мадэляў; зададзеныя, а не дынамічна звязаныя шляхі выветрывання; сучасная геаграфія; спрошчаны акіян; фіксаваны метан; нулявыя нахіл восі і эксцэнтрысітэт; адсутнасць відавочна зададзеных глеб, расліннасці і зваротнай сувязі біясферы; нявызначаныя межы тэмпературы і вуглякіслага газу; і вялікія разыходжанні мадэляў каля вільготнага і некіравальнага парніковых рэжымаў.

Наколькі ўпэўненым павінен быць шырокі чытач? Высокая ўпэўненасць, што даследаванне пашырае праўдападобны мадэльны дыяпазон і выяўляе дапушчэнні, якія ім кіруюць. Умераная ўпэўненасць у лікавым інтэрвале як карыснай рамцы ў межах гэтай мадэлі. Нізкая ўпэўненасць у любой дакладнай даце, бо найбольш далёкія канцы залежаць ад наўмысна крайніх кліматычных шляхоў і нявызначанай біялогіі.

Крыніцы

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