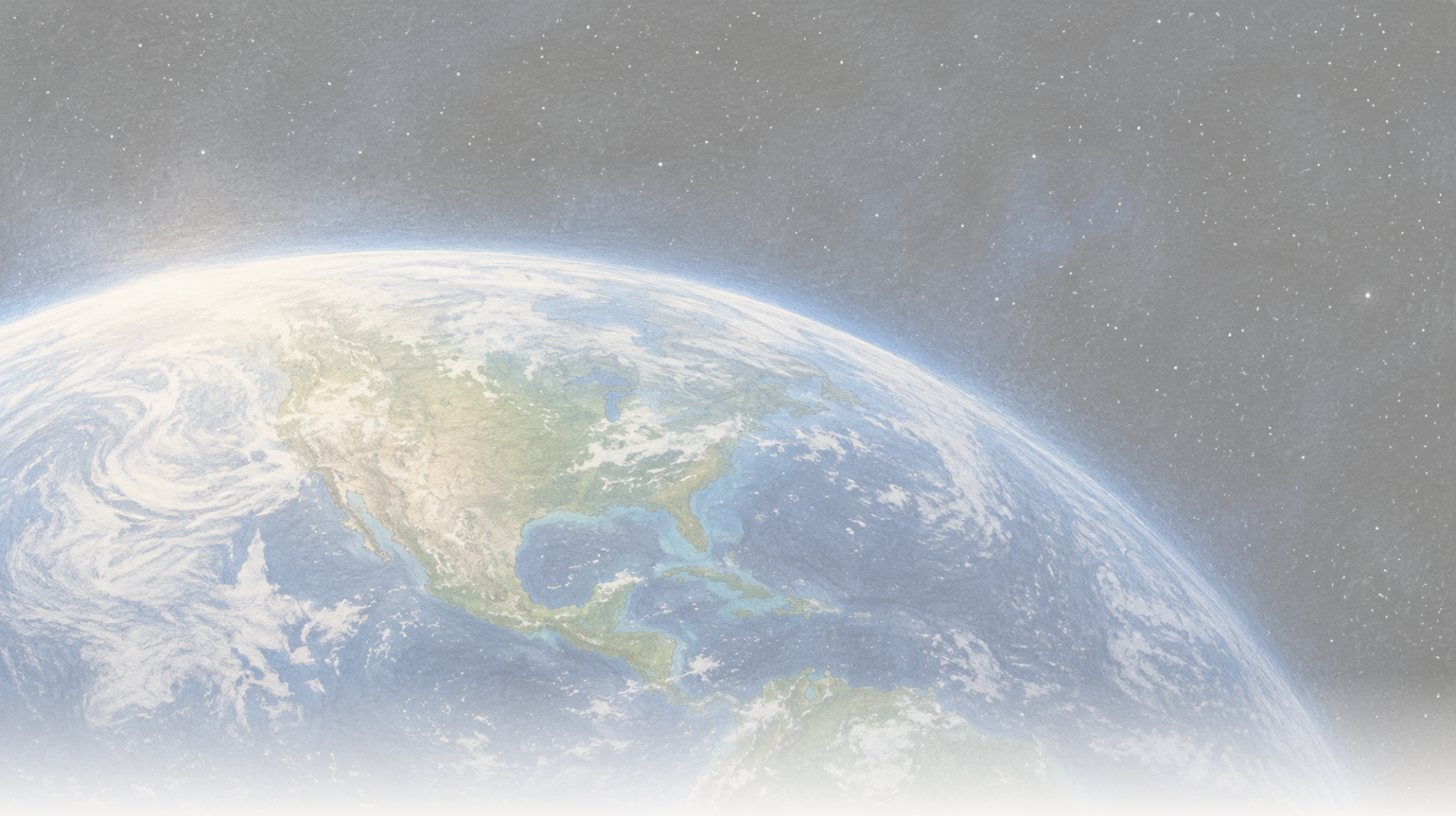




The CLEAN PAPER

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

Για πόσο μπορεί η Γη να παραμείνει πράσινη; Ένα κλιματικό μοντέλο δίνει εύρη, όχι ημερομηνία καταστροφής

Είκοσι εννέα τρισδιάστατες κλιματικές προσομοιώσεις τοποθετούν διαφορετικά όρια για τη φωτοσυνθετική βιοσφαίρα της Γης περίπου 1,35 έως 1,87 δισεκατομμύρια χρόνια από σήμερα. Οι τιμές εξαρτώνται από σκόπιμα απλουστευμένες διαδρομές για την αποσάθρωση των πετρωμάτων, τη θερμότητα και τα χαμηλότερα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν τα φυτά. Δεν προβλέπουν πότε θα τελειώσουν όλα τα φυτά, κάθε ζωή, ο πολιτισμός ή ο πλανήτης.

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

Για πόσο μπορεί η Γη να παραμείνει πράσινη; Ένα κλιματικό μοντέλο δίνει εύρη, όχι ημερομηνία καταστροφής

Ένα φύλλο ζει μέσα σε μια στενή ισορροπία. Χρειάζεται φως, νερό, διοξείδιο του άνθρακα και μια θερμοκρασία που να μπορεί να ανεχθεί η χημεία του. Στη διάρκεια μιας ανθρώπινης ζωής, ο Ήλιος μοιάζει να είναι το σταθερό μέρος αυτής της ισορροπίας. Σε διάστημα ενός δισεκατομμυρίου ετών, δεν είναι.

Καθώς ο Ήλιος γερνά στην κύρια ακολουθία, γίνεται αργά φωτεινότερος. Περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει τη Γη, αλλά ο πλανήτης διαθέτει μια μακροπρόθεσμη απόκριση: αντιδράσεις ανάμεσα στο νερό της βροχής, το διοξείδιο του άνθρακα και τα πυριτικά πετρώματα μπορούν να αφαιρούν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Αυτό εξασθενεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου και αντισταθμίζει μέρος της θέρμανσης. Η ίδια απόκριση που ψύχει τον πλανήτη μπορεί τελικά να στερήσει από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς τον άνθρακα που χρησιμοποιούν για να κατασκευάσουν ζωντανό ιστό.

Μια νέα εργασία στο *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* ρωτά ποιο όριο μπορεί να φτάσει πρώτο: υπερβολική ζέστη ή πολύ λίγο διοξείδιο του άνθρακα. Η απάντησή της δεν είναι μια ημερομηνία κατά την οποία «πεθαίνει» η Γη. Σε δύο σκόπιμα απλουστευμένες μελλοντικές διαδρομές, τα υιοθετημένα όρια για τη φωτοσυνθετική ζωή βρίσκονται περίπου **1,35 έως 1,87 δισεκατομμύρια χρόνια από σήμερα**.

Αυτό το εύρος αφορά τη **φυτική/φωτοσυνθετική βιοσφαίρα**: το μέρος του ζωντανού συστήματος της Γης που συντηρείται από φωτοσυνθετικούς οργανισμούς, ιδιαίτερα φυτά και άλλη ζωή που μετατρέπει το φως και το διοξείδιο του άνθρακα σε βιολογικό υλικό. Δεν είναι πρόβλεψη για κάθε μικρόβιο. Δεν είναι η διάρκεια ζωής του ανθρώπινου πολιτισμού. Δεν είναι η διάρκεια ζωής του πλανήτη.

Ο πλανητικός θερμοστάτης έχει δύο αβέβαιες ρυθμίσεις

Η κεντρική αβεβαιότητα είναι η **αποσάθρωση των πυριτικών πετρωμάτων**. Το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται στο νερό της βροχής, αντιδρά με πυριτικά πετρώματα και τελικά μεταφέρεται προς τους ωκεανούς και τα ιζήματα. Τα ηφαίστεια επιστρέφουν διοξείδιο του άνθρακα σε γεωλογικούς χρόνους. Μαζί, αυτές οι διεργασίες αποτελούν μέρος του κύκλου ανθρακικών-πυριτικών, που συχνά περιγράφεται ως πλανητικός θερμοστάτης.

Σε έναν θερμότερο και υγρότερο κόσμο, η αποσάθρωση μπορεί να επιταχυνθεί και να αφαιρεί διοξείδιο του άνθρακα ταχύτερα. Οι επιστήμονες όμως δεν γνωρίζουν πόσο έντονα αυτή η απόκριση θα ελέγχει τη Γη υπό έναν φωτεινότερο μελλοντικό Ήλιο. Οι Jacob Haqq-Misra και Eric Wolf δεν επέλεξαν λοιπόν μία υποτιθέμενη σωστή διαδρομή. Μοντελοποίησαν δύο

οριακά σενάρια (end members): σκόπιμα ακραίες περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται για να περικλείσουν την αβεβαιότητα.

- Στο **οριακό σενάριο ασθενούς αποσάθρωσης**, το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα παραμένει στα 400 μέρη ανά εκατομμύριο ενώ ο φωτεινότερος Ήλιος αυξάνει τη θερμοκρασία.
- Στο **οριακό σενάριο ισχυρής αποσάθρωσης**, η παγκόσμια μέση θερμοκρασία επιφάνειας παραμένει στους 288 kelvin, περίπου 15 βαθμούς Κελσίου, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα μειώνεται καθώς αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία.

Κανένας από τους δύο κλάδους δεν παρουσιάζεται ως το πραγματικό μέλλον της Γης. Ο πρώτος ρωτά τι θα έκανε η θερμότητα αν το διοξείδιο του άνθρακα παρέμενε υψηλό. Ο δεύτερος ρωτά τι θα έκανε η έλλειψη άνθρακα αν η αποσάθρωση κρατούσε την παγκόσμια θερμοκρασία κοντά στον σημερινό μέσο όρο.

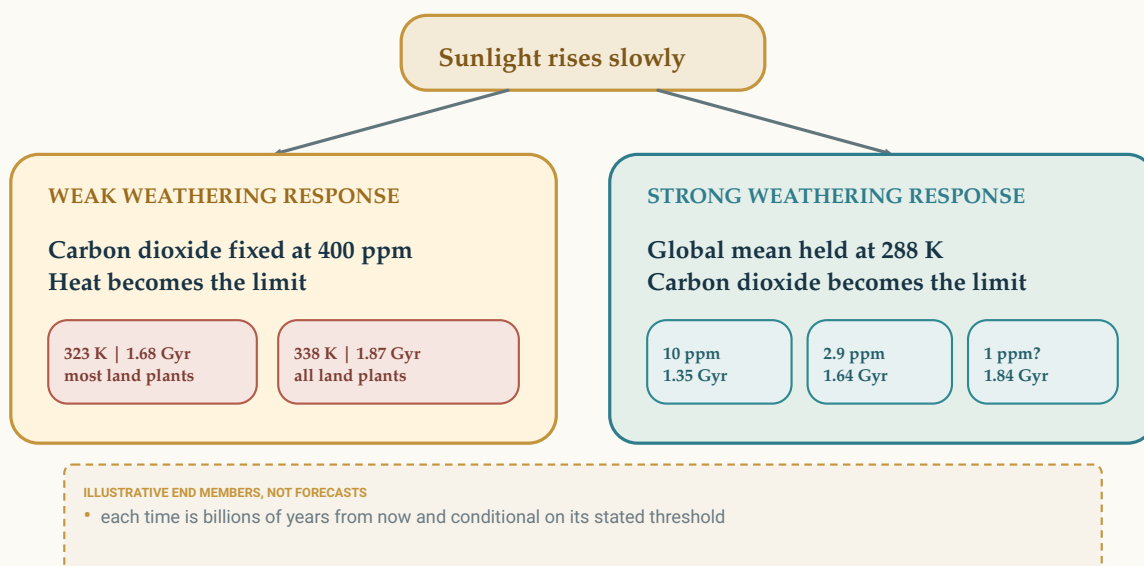
Πώς μπορεί η αποσάθρωση να λειτουργεί σαν θερμοστάτης;

Η αναλογία αφορά την ανάδραση, όχι έναν κυριολεκτικό διακόπτη ρύθμισης. Όταν ένα θερμότερο κλίμα επιταχύνει τη χημική αποσάθρωση, περισσότερο ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να καταλήξει σε διαλυμένη ύλη, ορυκτά και ιζήματα. Η αφαίρεση αυτού του αερίου του θερμοκηπίου αντισταθμίζεται σε μέρος της αρχικής θέρμανσης. Σε πολύ μεγάλες χρονικές κλίμακες, η ηφαιστειακή απαέρωση επιστρέφει διοξείδιο του άνθρακα.

Η ισχύς κάθε κρίκου εξαρτάται από τις βροχοπτώσεις, τα εκτεθειμένα πετρώματα, τη διάβρωση, τη βιολογία, την τεκτονική και τη χημεία των ωκεανών. Γι' αυτό η εργασία δοκιμάζει οριακές αποκρίσεις αντί να αντιμετωπίζει τον «θερμοστάτη» ως γνωστή μηχανή.

One brighter Sun, two illustrative limits

The study brackets uncertainty; it does not assign either future a probability.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Η εργασία περιλαμβάνει ένα αβέβαιο μέλλον με δύο ενδεικτικά οριακά σενάρια. Αν η αποσάθρωση αποκρίνεται ασθενώς, η αυξανόμενη θερμότητα φτάνει τα υιοθετημένα όρια των χερσαίων φυτών. Αν αποκρίνεται ισχυρά, η πτώση του διοξειδίου του άνθρακα φτάνει τα υιοθετημένα όρια της φωτοσύνθεσης. Πρόκειται για υπό όρους κλάδους μοντέλου, όχι για πιθανότητες ή ημερομηνίες αντίστροφης μέτρησης.

The Clean Paper CC BY 4.0

Είκοσι εννέα σταθεροποιημένοι κόσμοι μοντέλου, όχι μία ταινία δύο δισεκατομμυρίων ετών

Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το ExoCAM, ένα τρισδιάστατο παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο, για να υπολογίσουν **29 κλίματα μόνιμης κατάστασης** σε συνδυασμούς ισχυρότερης ηλιακής ακτινοβολίας και χαμηλότερου διοξειδίου του άνθρακα. Κάθε περίπτωση εκτελέστηκε για 70 έτη μοντέλου. Εδώ, ένα έτος μοντέλου είναι ένας προσομοιωμένος ετήσιος κύκλος υπό σταθερές συνθήκες: είναι χρόνος εκτέλεσης που χρησιμοποιείται για να αφεθεί το τεχνητό κλίμα να σταθεροποιηθεί, όχι ένα βήμα σε πρόβλεψη του μέλλοντος της Γης χρόνο προς χρόνο. Τα τελευταία 20 έτη λήφθηκαν ως μέσος όρος αφού το προσομοιωμένο κλίμα είχε χρόνο να σταθεροποιηθεί.

Αυτές οι 29 περιπτώσεις είναι ξεχωριστοί κόσμοι μοντέλου. Κάθε εκτέλεση είναι ένα σημείο σε ένα πλέγμα και απαντά στην ερώτηση «ποιο σταθεροποιημένο κλίμα ταιριάζει σε αυτό το επιλεγμένο ζεύγος ηλιακής ακτινοβολίας και διοξειδίου του άνθρακα;». Ο υπολογιστής δεν ξεκίνησε από τη σημερινή Γη και δεν εξέλιξε συνεχώς την ατμόσφαιρα, τα πετρώματα, τους ωκεανούς και τους ζωντανούς οργανισμούς της για τα επόμενα δύο δισεκατομμύρια χρόνια.

Αντίθετα, οι συγγραφείς χάραξαν τις δύο σχηματικές διαδρομές αποσάθρωσης μέσα από αυτά τα προϋπολογισμένα σημεία· η διαδρομή ανάμεσα στα σημεία δεν προσομοιώθηκε η ίδια.

Ο πίνακας αναπαράγει τους συνδυασμούς ηλιακής ακτινοβολίας και διοξειδίου του άνθρακα στο επίσημο αρχείο δεδομένων του μοντέλου. Τα αναγνωριστικά των περιπτώσεων προστέθηκαν εδώ ως βοήθημα ανάγνωσης, με τη σειρά του αρχείου. **S/S0** είναι η σχετική ηλιακή σταθερά: η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια που χρησιμοποιείται στο μοντέλο διαιρεμένη με τη σημερινή της τιμή, S0. Μια τιμή 1.2 σημαίνει επομένως 20% περισσότερη εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια από σήμερα. **CO2 (ppm)** είναι ο λόγος ανάμιξης του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα σε μόρια ανά εκατομμύριο ατμοσφαιρικών μορίων.

ID περίπτωσης	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

Η Γη του μοντέλου είναι αναγνωρίσιμη αλλά σκόπιμα περιορισμένη. Έχει το μέγεθος της Γης και χρησιμοποιεί τη σημερινή γεωγραφία. Διαθέτει έναν απλουστευμένο ωκεανό τύπου slab αντί για πλήρως κυκλοφορούντα ωκεανό, ατμοσφαιρική πίεση περίπου ίση με τη

σημερινή γήινη τιμή (ένα bar) και σταθερό μεθάνιο. Η τροχιά της είναι απολύτως κυκλική (μηδενική εκκεντρότητα) και ο άξονας περιστροφής της δεν έχει κλίση (μηδενική λόξωση). Δεν περιλαμβάνει ρητά εδάφη, βλάστηση ή ανάδραση από μια μεταβαλλόμενη βιοσφαίρα. Το σημαντικότερο, το κλιματικό μοντέλο δεν είναι δυναμικά συζευγμένο με μοντέλο αποσάθρωσης πετρωμάτων. Με άλλα λόγια, το ExoCAM δεν υπολογίζει την αποσάθρωση, δεν τη χρησιμοποιεί για να ενημερώσει το διοξείδιο του άνθρακα και μετά δεν εκτελεί το επόμενο κλίμα μέσα σε βρόχο ανάδρασης. Οι ερευνητές καθόρισαν εκ των προτέρων τις δύο οριακές διαδρομές και τις χάραξαν μέσα από το κλιματικό πλέγμα των 29 περιπτώσεων.

Τι σημαίνει «μόνιμη κατάσταση» σε ένα κλιματικό μοντέλο;

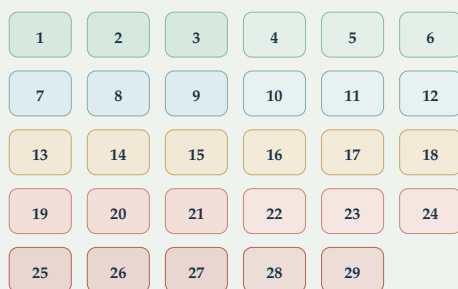
Μια περίπτωση μόνιμης κατάστασης είναι ένα κλίμα μοντέλου που αφήνεται να σταθεροποιηθεί υπό έναν επιλεγμένο Ήλιο και μια επιλεγμένη ατμόσφαιρα. Ο καιρός εξακολουθεί να αλλάζει από ημέρα σε ημέρα και από έτος σε έτος μέσα στην προσομοίωση, αλλά οι μακροπρόθεσμοι μέσοι όροι του παύουν να μετατοπίζονται έντονα.

Αυτό είναι χρήσιμο για να ρωτήσουμε «ποιο κλίμα ταιριάζει σε αυτές τις συνθήκες;». Είναι διαφορετικό από το να προβλέψουμε την ακριβή διαδρομή με την οποία η πραγματική Γη μετακινείται από ένα σύνολο συνθηκών στο επόμενο.

Twenty-nine climate snapshots, not one future-Earth movie

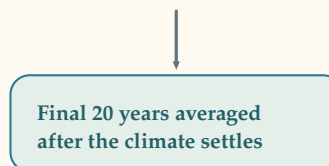
Each tile is a separate ExoCAM world under prescribed sunlight and carbon dioxide.

29 SEPARATE CASES



EACH CASE

70 model years



SNAPSHOTS, NOT A CONTINUOUS TWO-BILLION-YEAR SIMULATION

- the future paths are traced schematically through separate settled climates

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Κάθε πλακίδιο είναι μια ξεχωριστή κλιματική εκτέλεση ExoCAM για 70 έτη μοντέλου, με τα τελευταία 20 έτη να λαμβάνονται ως μέσος όρος. Η μελέτη δειγματοληπτεί 29 σταθεροποιημένα κλίματα σε προκαθορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και διοξειδίου του άνθρακα· δεν προσομοιώνει μία Γη που εξελίσσεται συνεχώς επί δύο δισεκατομμύρια χρόνια.

Οριακό σενάριο ένα: αρκετό διοξείδιο του άνθρακα, υπερβολική ζέστη

Στον κλάδο ασθενούς αποσάθρωσης, το διοξείδιο του άνθρακα παραμένει σταθερό στα 400 μέρη ανά εκατομμύριο. Καθώς αυξάνεται η ηλιακή εισροή, η θερμότητα γίνεται ο περιοριστικός παράγοντας.

Η εργασία χρησιμοποιεί δύο κατώφλια παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας από προηγούμενες μελέτες:

- Στους **323 kelvin**, περίπου **50 βαθμούς Κελσίου** ως παγκόσμιο ετήσιο μέσο όρο, ο κόσμος θεωρείται υπερβολικά θερμός για τα περισσότερα χερσαία φυτά. Το μοντέλο φτάνει σε αυτό το κατώφλι σε περίπου **1,68 δισεκατομμύρια χρόνια**.
- Στους **338 kelvin**, περίπου **65 βαθμούς Κελσίου** ως παγκόσμιο ετήσιο μέσο όρο, ο κόσμος θεωρείται υπερβολικά θερμός για όλα τα χερσαία φυτά. Το μοντέλο φτάνει σε αυτό το κατώφλι σε περίπου **1,87 δισεκατομμύρια χρόνια**.

Αυτά είναι υιοθετημένα βιολογικά όρια, όχι καθολικές θερμοκρασίες στις οποίες κάθε φωτοσυνθετικός οργανισμός αποτυγχάνει αναγκαστικά. Ένας παγκόσμιος μέσος όρος κρύβει επίσης μεγάλες περιφερειακές διαφορές. Η μελέτη εξετάζει ξεχωριστά πού συνδυασμοί θερμοκρασίας και νερού μπορεί να παραμένουν κατάλληλοι, αλλά μια ετικέτα σε έναν κλιματικό χάρτη δεν μπορεί να καταγράψει κάθε μελλοντικό καταφύγιο ή προσαρμογή.

Οριακό σενάριο δύο: ανεκτή θερμοκρασία, πολύ λίγο διοξείδιο του άνθρακα

Στον κλάδο ισχυρής αποσάθρωσης, η παγκόσμια μέση θερμοκρασία διατηρείται στους 288 kelvin, περίπου 15 βαθμούς Κελσίου, ενώ το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα μειώνεται. Εδώ η απάντηση εξαρτάται από το πόσο λίγο άνθρακα θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν διαφορετικές φωτοσυνθετικές οδοί.

- Στο παραδοσιακό κατώφλι των **10 μερών ανά εκατομμύριο** — 10 μόρια διοξειδίου του άνθρακα για κάθε εκατομμύριο ατμοσφαιρικών μορίων — το όριο για τη φωτοσύνθεση C4 φτάνει σε περίπου **1,35 δισεκατομμύρια χρόνια**. Η φωτοσύνθεση C4 χρησιμοποιείται από φυτά όπως ο αραβόσιτος και το ζαχαροκάλαμο και συγκεντρώνει διοξείδιο του άνθρακα γύρω από το ένζυμο που το δεσμεύει.
- Η χρήση ενός εναλλακτικού κατωφλίου C4 των **2,9 μερών ανά εκατομμύριο**, που συζητείται σε προηγούμενες εργασίες, μετακινεί το όριο σε περίπου **1,64 δισεκατομμύρια**

χρόνια.

- Ένα προσωρινό κατώφλι **1 μέρους ανά εκατομμύριο**, που συνδέεται με πιθανή επιβίωση ορισμένων φυτών CAM—φυτών που χρησιμοποιούν μεταβολισμό οξέων των κρασουλαιδών, ο οποίος χωρίζει την πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα τη νύχτα από τη χρήση του την ημέρα — ή υδρόβιων φυτών ικανών να χρησιμοποιούν διαλυμένο διττανθρακικό, μετακινεί το όριο σε περίπου **1,84 δισεκατομμύρια χρόνια**.

Ο τελευταίος αριθμός συνοδεύεται από τη μεγαλύτερη βιολογική επιφύλαξη. Οι συγγραφείς αποκαλούν ρητά προσωρινό το όριο του ενός μέρους ανά εκατομμύριο. Δεν είναι πειραματικά καθιερωμένο κατώφλι επιβίωσης για όλα τα φυτά CAM ή την υδρόβια βλάστηση υπό συνθήκες μελλοντικής Γης.

C3, C4 και CAM είναι στρατηγικές, όχι σκάλα

Τα φυτά χρησιμοποιούν διαφορετικές βιοχημικές οδούς για να δεσμεύουν άνθρακα. Η **φωτοσύνθεση C3** είναι η συνηθέστερη. Η **φωτοσύνθεση C4**, που χρησιμοποιείται από φυτά όπως ο αραβόσιτος και το ζαχαροκάλαμο, συγκεντρώνει διοξείδιο του άνθρακα γύρω από το ένζυμο που δεσμεύει τον άνθρακα και μπορεί να λειτουργεί καλύτερα όταν το διοξείδιο του άνθρακα είναι σπάνιο. Ο **μεταβολισμός οξέων των κρασουλαιδών (CAM)** διαχωρίζει χρονικά την πρόσληψη και τη χρήση του άνθρακα μεταξύ νύχτας και ημέρας, βοηθώντας πολλά φυτά να εξοικονομούν νερό.

Πρόκειται για οικογένειες στρατηγικών με πολλές διαφορές μεταξύ ειδών, όχι για διαδοχικές βαθμίδες «καλύτερων» φυτών. Τα πολύ χαμηλά κατώφλια διοξειδίου του άνθρακα της εργασίας είναι παραδοχές για τη διερεύνηση πιθανών ορίων, όχι εγγυήσεις ότι ένα μελλοντικό οικοσύστημα θα εξελιχθεί ώστε να τα χρησιμοποιεί.

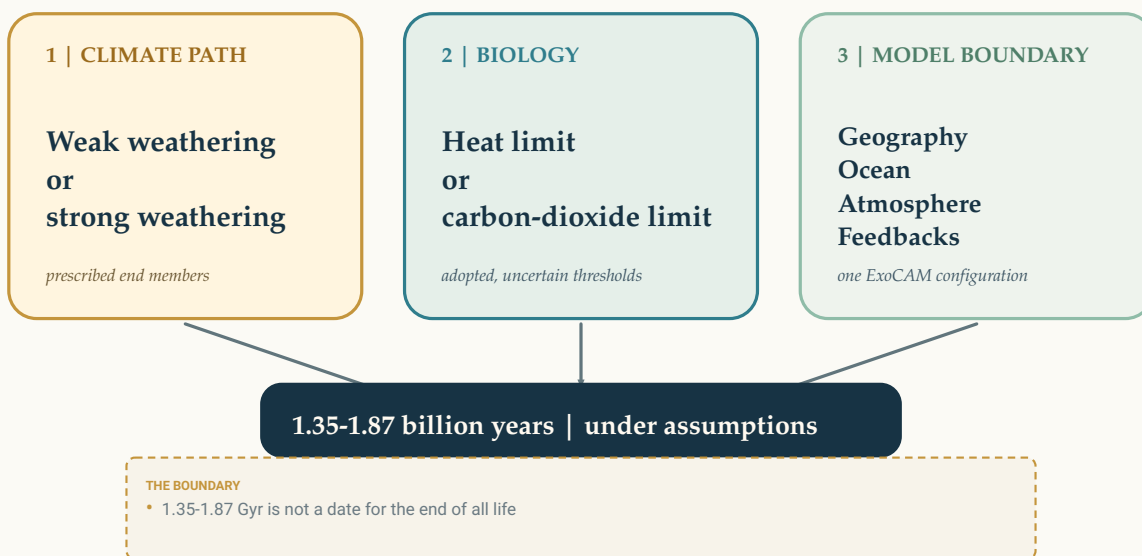
Γιατί τα 1,86 δισεκατομμύρια χρόνια δεν είναι ημερομηνία λήξης

Η κεντρική εκτίμηση της εργασίας, περίπου **1,86 δισεκατομμύρια χρόνια**, είναι ο μέσος όρος των δύο αισιόδοξων ανώτερων τελικών σημείων: 1,84 δισεκατομμύρια χρόνια στον κλάδο που περιορίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα και 1,87 δισεκατομμύρια χρόνια στον κλάδο που περιορίζεται από τη θερμότητα. Είναι μια συμπαγής σύνοψη δύο διαφορετικών σεναρίων. Δεν είναι τρίτο αποτέλεσμα μοντέλου με μεγαλύτερη ακρίβεια και δεν είναι ημερομηνία καλύτερης εκτίμησης.

Ακόμη και το ευρύτερο εύρος από 1,35 έως 1,87 δισεκατομμύρια χρόνια δεν φέρει μία ενιαία πιθανότητα. Η κατώτερη και η ανώτερη τιμή του εξαρτώνται από διαφορετικές παραδοχές αποσάθρωσης, διαφορετικά βιολογικά κατώφλια και μία διαμόρφωση κλιματικού μοντέλου. Το εύρος μετρά τις επιλογές του πειράματος όσο μετρά και τον χρόνο.

The range is built from choices, not read from a clock

Change a path, threshold or model boundary and the endpoint can move.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Το εύρος 1,35 έως 1,87 δισεκατομμυρίων ετών προκύπτει μόνο αφού επιλεγούν μια διαδρομή αποσάθρωσης, ένα βιολογικό κατώφλι και ένα όριο του μοντέλου. Είναι χάρτης παραδοχών, όχι ρολόι που τελειώνει με την εξαφάνιση κάθε ζωής.

The Clean Paper CC BY 4.0

Άλλα όρια μπορεί να φτάσουν πρώτα

Οι μεγαλύτερες εκτιμήσεις για τη διάρκεια της φυτικής/φωτοσυνθετικής βιοσφαίρας πλησιάζουν ένα ξεχωριστό και αβέβαιο όριο: ένα υγρό ή ανεξέλεγκτο φαινόμενο θερμοκηπίου που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγάλη απώλεια των ωκεανών. Τα κλιματικά μοντέλα διαφωνούν σημαντικά για το πότε αρχίζουν αυτές οι καταστάσεις υπό αυξανόμενη ηλιακή ακτινοβολία, ιδιαίτερα μακριά από τις σημερινές συνθήκες. Ορισμένες εκτιμήσεις τις τοποθετούν πριν από το πιο αισιόδοξο όριο φωτοσύνθεσης.

Αυτό σημαίνει ότι ο ανώτερος κλάδος δεν μπορεί να διαβαστεί ως υπόσχεση ότι η Γη θα διατηρήσει τους ωκεανούς της, τις γνώριμες ηπείρους ή κατοικήσιμες επιφανειακές συνθήκες μέχρι 1,87 δισεκατομμύρια χρόνια από σήμερα. Ούτε περιλαμβάνει το μοντέλο τη μελλοντική τεκτονική πλακών, αλλαγές στην έκταση της ξηράς, εξελισσόμενα οικοσυστήματα ή έναν πλήρως δυναμικό ωκεανό. Οι υπολογισμοί του για το πώς η ατμόσφαιρα απορροφά και εκπέμπει ενέργεια ωθούνται επίσης σε καθεστώς έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και εξαιρετικά χαμηλού διοξειδίου του άνθρακα, όπου διαφορετικά μοντέλα αποκλίνουν.

Η εξελικτική προσαρμογή και η τεχνολογική παρέμβαση εμφανίζονται στη συζήτηση της εργασίας ως δυνατότητες. Δεν είναι αποτελέσματα των 29 κλιματικών προσομοιώσεων.

Το μοντέλο δεν δείχνει μελλοντικούς οργανισμούς να εξελίσσουν φωτοσυνθετική οδό που λειτουργεί σε ένα μέρος ανά εκατομμύριο και δεν δείχνει έναν πολιτισμό να διαχειρίζεται την ατμόσφαιρα επί ένα δισεκατομμύριο χρόνια.

Αυτό δεν είναι αποτέλεσμα για τη σημερινή κλιματική κρίση

Η αύξηση της φωτεινότητας του Ήλιου δρα σε εκατοντάδες εκατομμύρια έως δισεκατομμύρια χρόνια. Η σύγχρονη ανθρωπογενής θέρμανση προέρχεται από ταχέως αυξανόμενα αέρια του θερμοκηπίου σε δεκαετίες και αιώνες. Είναι διαφορετικές εξαναγκάσεις, σε ριζικά διαφορετικές χρονικές κλίμακες, που απαντούν σε διαφορετικά ερωτήματα.

Τίποτα σε αυτή τη μελέτη δεν αποδυναμώνει τα στοιχεία για τη σημερινή κλιματική αλλαγή ούτε υποστηρίζει αναβολή δράσης. Μια βιοσφαίρα που ίσως διατηρεί κάποια φωτοσυνθετική ζωή σε ένα μακρινό σενάριο μοντέλου δεν είναι το ίδιο πράγμα με ένα κλίμα στο οποίο οι σημερινές κοινωνίες και τα οικοσυστήματα παραμένουν ασφαλή.

Η εργασία έχει αξία επειδή κάνει μια πολύ μακρινή ερώτηση πιο πειθαρχημένη. Δείχνει ότι παλαιότερα, απλούστερα μοντέλα μπορεί να υπερεκτιμούσαν τη θέρμανση όταν αυξανόταν η ηλιακή ακτινοβολία ενώ το διοξείδιο του άνθρακα παρέμενε σταθερό, και ότι η φωτοσυνθετική ζωή μπορεί να έχει περισσότερες οδούς επιβίωσης από όσες υποδηλώνει ένα μόνο κανονικό κατώφλι άνθρακα. Δείχνει επίσης γιατί κάθε επιπλέον κλάσμα ενός δισεκατομμυρίου ετών συνοδεύεται από μια αλυσίδα παραδοχών.

Ο Ήλιος που τροφοδοτεί ένα φύλλο αλλάζει αργά. Το αν η Γη θα παραμείνει πράσινη για άλλα 1,35, 1,87 ή κάποιον άλλο αριθμό δισεκατομμυρίων ετών θα εξαρτηθεί από το πώς θα ανταποκριθούν μαζί πετρώματα, νερό, ατμόσφαιρα και ζωή. Το έντιμο αποτέλεσμα δεν είναι μια ημερομηνία. Είναι μια ευρύτερη εικόνα αυτής της ισορροπίας.

Καθαρή σύνοψη

Μια τρισδιάστατη κλιματική μελέτη ρωτά για πόσο μπορεί να επιβιώσει η φυτική — φωτοσυνθετική — βιοσφαίρα της Γης καθώς ο Ήλιος γίνεται αργά φωτεινότερος. Οι ερευνητές υπολόγισαν 29 ξεχωριστά κλίματα μόνιμης κατάστασης και χάραξαν μέσα από αυτά δύο ενδεικτικά οριακά σενάρια. Με ασθενή αποσάθρωση και διοξείδιο του άνθρακα σταθερό στα 400 μέρη ανά εκατομμύριο, τα υιοθετημένα θερμικά όρια για τα χερσαία φυτά φτάνουν περίπου σε 1,68 και 1,87 δισεκατομμύρια χρόνια από σήμερα. Με ισχυρή αποσάθρωση και παγκόσμια μέση θερμοκρασία σταθερή στους 288 kelvin, περίπου 15 βαθμούς Κελσίου, τα υιοθετημένα όρια διοξειδίου του άνθρακα για τη φωτοσύνθεση φτάνουν περίπου σε 1,35, 1,64 και, χρησιμοποιώντας ένα προσωρινό κατώφλι, 1,84 δισεκατομμύρια χρόνια. Τα συχνά αναφερόμενα 1,86 δισεκατομμύρια χρόνια είναι απλώς ο στρογγυλοποιημένος μέσος όρος των

δύο αισιόδοξων ανώτερων τελικών σημείων. Πρόκειται για εύρη μοντέλου που εξαρτώνται από τα σενάρια, όχι για ημερομηνία κατά την οποία θα τελειώσει η Γη, η ανθρωπότητα ή κάθε ζωή. Το μοντέλο χρησιμοποιεί προκαθορισμένες διαδρομές, σημερινή γεωγραφία, ωκεανό τύπου slab και καμία ρητή σύζευξη εδάφους-βλάστησης ή κλίματος-αποσάθρωσης, ενώ οι μεγαλύτερες εκτιμήσεις πλησιάζουν αβέβαια όρια θερμοκηπίου και απώλειας ωκεανών.

Έλεγχος χωρίς υπερβολές

Τι δείχνει η εργασία: Σε αυτή τη διαμόρφωση του ExoCAM, τα τρισδιάστατα κλίματα γενικά θερμαίνονται λιγότερο υπό αυξανόμενη ηλιακή ακτινοβολία και σταθερό διοξείδιο του άνθρακα από ό,τι στα απλουστευμένα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για σύγκριση. Σε δύο προκαθορισμένα οριακά σενάρια αποσάθρωσης και αρκετά υιοθετημένα βιολογικά κατώφλια, τα όρια της φυτικής/φωτοσυνθετικής βιοσφαίρας βρίσκονται περίπου 1,35 έως 1,87 δισεκατομμύρια χρόνια από σήμερα.

Τι είναι εύλογο αλλά δεν έχει καθιερωθεί: Ότι ορισμένα φυτά CAM ή υδρόβια φυτά που χρησιμοποιούν διαλυμένο διττανθρακικό θα μπορούσαν να διατηρήσουν φωτοσύνθεση κοντά σε ένα μέρος ανά εκατομμύριο ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα· ότι η προσαρμογή ή η τεχνολογία θα μπορούσε να παρατείνει περαιτέρω τη φωτοσυνθετική ζωή· και ότι η πραγματική διαδρομή κλίματος-αποσάθρωσης θα παραμείνει ανάμεσα στα δύο οριακά σενάρια του μοντέλου.

Τι δεν δείχνει: Σταθερή ημερομηνία για το τέλος όλων των φυτών, κάθε ζωής, του ανθρώπινου πολιτισμού, των ωκεανών της Γης ή του πλανήτη· μία συνεχή προσομοίωση των επόμενων δύο δισεκατομμυρίων ετών· ή οποιονδήποτε λόγο να υποτιμηθεί η σημερινή ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή.

Κύριοι περιορισμοί: Είκοσι εννέα περιπτώσεις μόνιμης κατάστασης από μία οικογένεια κλιματικών μοντέλων· προκαθορισμένες αντί δυναμικά συζευγμένες διαδρομές αποσάθρωσης· σημερινή γεωγραφία· ωκεανός τύπου slab· σταθερό μεθάνιο· μηδενική λόξωση και εκκεντρότητα· απουσία ρητών εδαφών, βλάστησης ή ανάδρασης της βιοσφαίρας· αβέβαια κατώφλια θερμότητας και διοξειδίου του άνθρακα· και μεγάλη διαφωνία μεταξύ μοντέλων κοντά σε συνθήκες υγρού και ανεξέλεγκτου θερμοκηπίου.

Πόση εμπιστοσύνη πρέπει να έχει ένας γενικός αναγνώστης; Υψηλή εμπιστοσύνη ότι η μελέτη διευρύνει το εύλογο εύρος του μοντέλου και εντοπίζει τις παραδοχές που το ελέγχουν. Μέτρια εμπιστοσύνη στο αριθμητικό εύρος ως χρήσιμο πλαίσιο μέσα σε αυτό το μοντέλο. Χαμηλή εμπιστοσύνη σε οποιαδήποτε ακριβή ημερομηνία, επειδή τα πιο απομακρυσμένα τελικά σημεία εξαρτώνται από σκόπιμα ακραίες κλιματικές διαδρομές και αβέβαιη βιολογία.

Πηγές

Haq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)

<https://doi.org/10.1029/2025JD045586>

Haq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870>