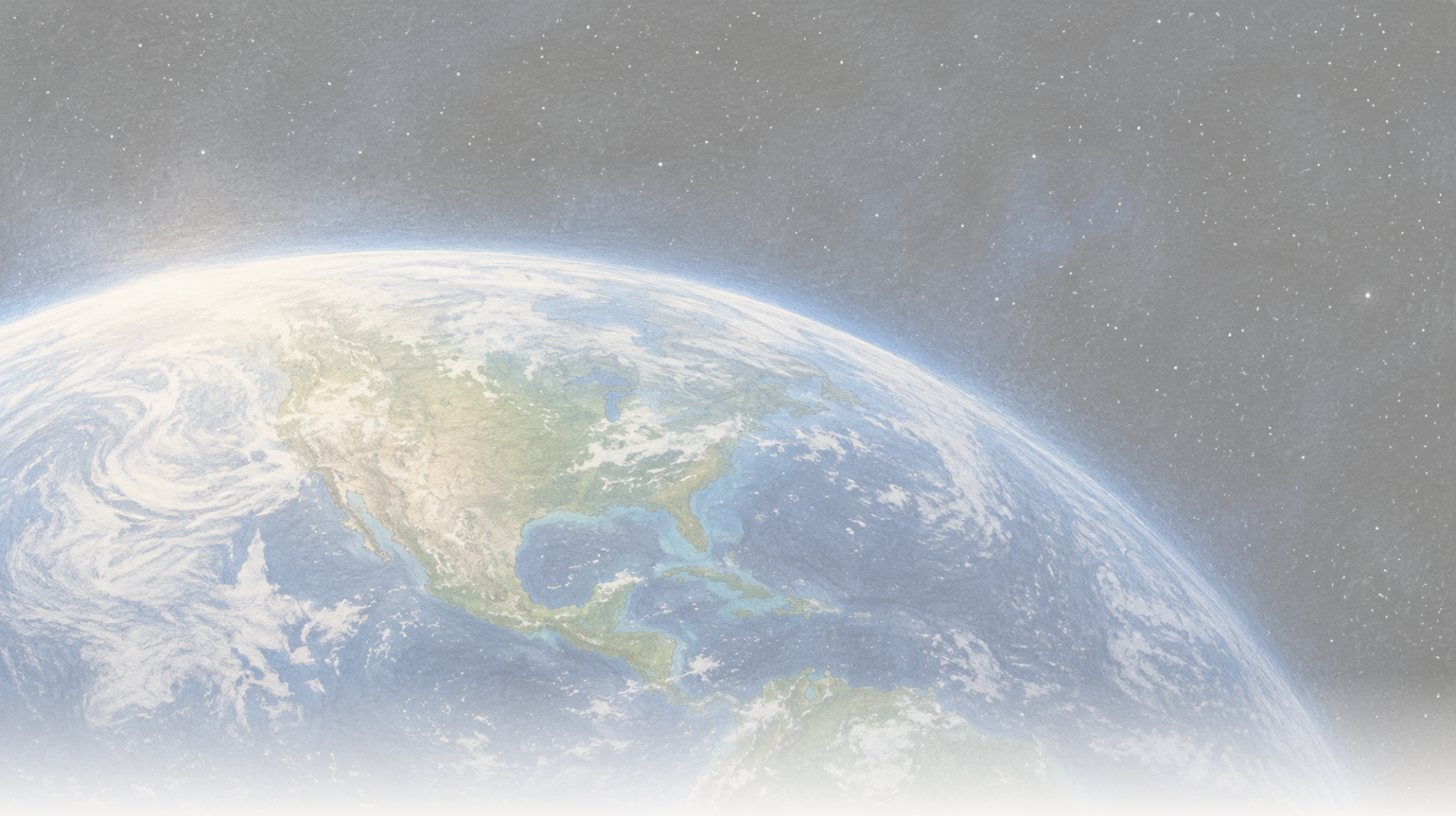




The CLEAN PAPER

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

כמה זמן כדור הארץ יכול להישאר ירוק? מודל אקלים מציע טווחים, לא תאריך יום-דין

עשרים ותשע סימולציות אקלים תלת-ממדיות מציבות גבולות שונים לביוספירה הפוטוסינתטית של כדור הארץ בין כ-1.35 ל-1.87 מיליארד שנים מהיום. הערכים תלויים במסלולים מפושטים בכוונה של בליית סלעים, חום ורמות הפחמן הדו-חמצני הנמוכות ביותר שצמחים עשויים לנצל. הם אינם מנבאים מתי ייעלמו כל הצמחים, כל החיים, הציוויליזציה או כוכב הלכת.

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

כמה זמן כדור הארץ יכול להישאר ירוק? מודל אקלים מציע טווחים, לא תאריך יום-דין

עלה מתקיים בתוך פשרה צרה. הוא צריך אור, מים, פחמן דו-חמצני וטמפרטורה שהכימיה שלו מסוגלת לשאת. לאורך חיי אדם, השמש נראית כמו החלק הקבוע בעסקה הזאת. לאורך מיליארד שנים, היא אינה קבועה.

כאשר השמש מזדקנת על הרצף הראשי, היא נעשית בהדרגה בהירה יותר. יותר אור שמש מחמם את כדור הארץ, אבל לכוכב הלכת יש תגובה ארוכת טווח: תגובות בין מי גשם, פחמן דו-חמצני וסלעי סיליקט יכולות להסיר פחמן דו-חמצני מן האטמוספירה. זה מחליש את אפקט החממה ומקזז חלק מן ההתחממות. אותה תגובה שמקרת את כוכב הלכת יכולה בסופו של דבר גם להרעב אורגניזמים פוטוסינתטיים מן הפחמן שבו הם משתמשים לבניית רקמה חיה.

מאמר חדש ב-Atmospheres Research: Geophysical of Journal שואל איזה גבול עשוי להגיע קודם: יותר מדי חום, או מעט מדי פחמן דו-חמצני. התשובה שלו אינה תאריך שבו כדור הארץ "מת". בשני מסלולי עתיד שפושטו בכוונה, הגבולות שנבחרו לחיים פוטוסינתטיים נופלים בין בערך 1.35 ל-1.87 מיליארד שנים מהיום.

הטווח הזה מתייחס לביוספירה הצמחית: החלק במערכת החיים של כדור הארץ שמתקיים באמצעות אורגניזמים פוטוסינתטיים, במיוחד צמחים וצורות חיים אחרות שהופכות אור ופחמן דו-חמצני לחומר ביולוגי. זו אינה תחזית לכל חיידק. זו אינה תוחלת החיים של הציוויליזציה האנושית. וזו אינה תוחלת החיים של כוכב הלכת.

לתרמוסטט הפלנטרי יש שתי הגדרות לא ודאיות

איהוודאות המרכזית היא בליית סיליקטים. פחמן דו-חמצני מתמוסס במי גשם, מגיב עם סלעי סיליקט ובסופו של דבר נישא לכיוון אוקיינוסים ומשקעים. הרי געש מחזירים פחמן דו-חמצני לאורך זמנים גאולוגיים. יחד, התהליכים האלה הם חלק ממחזור הקרבונט-סיליקט, המתואר לעיתים קרובות כתרמוסטט פלנטרי.

בעולם חם ולח יותר, הבליה עשויה להאיץ ולהסיר פחמן דו-חמצני מהר יותר. אבל מדענים אינם יודעים עד כמה חזק התהליך הזה ישלוט בכדור הארץ תחת שמש עתידית בהירה יותר. לכן Wolf Eric-i Haqq-Misra Jacob לא בחרו מסלול אחד כביכול "נכון". הם דיגמנו שני מקרי קצה: מקרים קיצוניים במכוון שנועדו למסגר את איהוודאות.

- במקרה הקצה של בליה חלשה, פחמן דו-חמצני אטמוספרי נשאר ב-400 חלקים למיליון בזמן שהשמש המתבהרת מעלה את הטמפרטורה.
- במקרה הקצה של בליה חזקה, הטמפרטורה הממוצעת הגלובלית של פני השטח נשארת 288 קלווין, בערך 15 מעלות צלזיוס, בזמן שפחמן דו-חמצני נשאב מן האטמוספירה ככל שאור השמש גדל.

אף אחד מן הענפים אינו מוצג כעתיד האמיתי של כדור הארץ. הראשון שואל מה יעשה החום אם פחמן דו-חמצני יישאר גבוה. השני שואל מה תעשה רעבת פחמן אם הבליה תשמור על הטמפרטורה הגלובלית הממוצעת קרוב לערך הנוכחי.

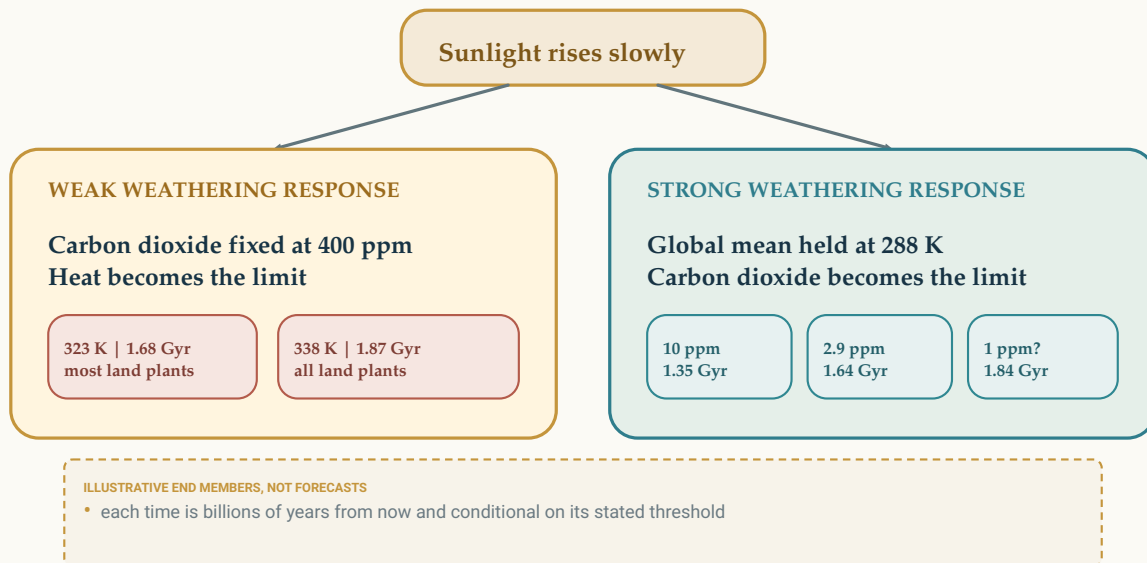
איך בליה יכולה לפעול כמו תרמוסטט?

פחמן יותר כימית, בליה מאיץ יותר חם אקלים כאשר אמיתי. בקרה בכפתור לא במשוב, עוסקת האנלוגיה מתנגדת הזה החממה גז הסרת ולמשקעים. למינרלים מומס, לחומר להגיע יכול האטמוספירה מן דו-חמצני

דו־חמצני. פחמן מחזירה געשית פליטה מאוד, ארוכים בזמנים המקורית. ההתחממות מן לחלק החוזק של כל חוליה תלוי בכמות המשקעים, סלע חשוף, סחיפה, ביולוגיה, טקטוניקה וכימיית האוקיינוס. זו הסיבה שהמאמר בודק תגובות גבול במקום להתייחס לתרמוסטט כמכונה שמאפייניה ידועים.

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

המאמר ממסגר עתיד לא ודאי באמצעות שני מקרי קצה להמחשה. אם הבליה מגיבה חלש, החום העולה מגיע לספים שנבחרו עבור צמחי יבשה. אם היא מגיבה חזק, פחמן דו־חמצני יורד עד לספים שנבחרו לפוטוסינתזה. אלה ענפי מודל מותנים, לא הסתברויות ולא תאריכי ספירה לאחור.

The Clean Paper CC BY 4.0

עשרים ותשעה עולמות מודל שהתייצבו, לא סרט אחד של שני מיליארד שנים

החוקרים השתמשו ב-ExoCAM, מודל אקלים גלובלי תלת־ממדי, כדי לחשב 29 אקלימים במצב יציב על פני שילובים של אור שמש חזק יותר ופחמן דו־חמצני נמוך יותר. כל מקרה הורץ במשך 70 שנות מודל. כאן שנת מודל אחת היא מחזור שנתי מדומה תחת תנאים קבועים: זהו זמן ריצה שנועד לאפשר לאקלים המלאכותי להתייצב, לא צעד בתחזית שנה־אחר־שנה של עתיד כדור הארץ. 20 השנים האחרונות חושבו כממוצע לאחר שהאקלים המדומה קיבל זמן להתייצב.

29 המקרים האלה הם עולמות מודל נפרדים. כל ריצה היא נקודה אחת ברשת, ועונה על השאלה "איזה אקלים יציב מתאים לצמד הנבחר הזה של אור שמש ופחמן דו־חמצני?" המחשב לא התחיל מכדור הארץ של היום ולא פיתח ברציפות את האטמוספירה, הסלעים, האוקיינוסים והחיים במשך שני מיליארד השנים הבאות. במקום זאת, המחברים

עקבו אחר שני מסלולי הבליה הסכמטיים דרך הנקודות שחושבו מראש; הדרך בין הנקודות לא סומלצה בעצמה.

הטבלה משחזרת את שילובי אור השמש ופחמן הדו-חמצני בארכיון נתוני המודל הרשמי. מזהי המקרים הם עזרי קריאה שנוספו כאן לפי סדר הארכיון. S/S0 הוא הקבוע הסולרי היחסי: האנרגיה הסולארית הנכנסת שבה נעשה שימוש במודל חלקי הערך הנוכחי שלה, S0. לכן ערך 1.2 פירושו 20% יותר אנרגיה סולארית נכנסת מהיום. CO2 (ppm) הוא יחס הערבוב האטמוספרי של פחמן דו-חמצני במולקולות למיליון מולקולות אטמוספירות.

מזהה מקרה	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

כדור הארץ של המודל מוכר אך מוגבל בכוונה. הוא בגודל כדור הארץ ומשתמש בגאוגרפיה הנוכחית. יש לו אוקיינוס slab מפושט במקום אוקיינוס בעל סירקולציה מלאה, לחץ אטמוספרי שנקבע בערך הנוכחי של כדור הארץ (בר אחד), ומתאן קבוע. המסלול שלו מעגלי לחלוטין (אקסצנטריות אפס), ולציר הסיבוב אין נטייה (obliquity אפס). אין בו קרקעות מפורשות, צמחייה או משוב מביוספרה משתנה. החשוב ביותר: מודל האקלים אינו מצומד דינמית למודל בליית סלעים. כלומר, ExoCAM אינו מחשב בליה, משתמש בה כדי לעדכן פחמן דו-חמצני ואז מריץ את האקלים הבא בלולאת משוב. במקום זאת החוקרים קבעו מראש את שני מסלולי הגבול ועקבו אחריהם דרך רשת 29 האקלימים.

מה פירוש "מצב יציב" במודל אקלים?

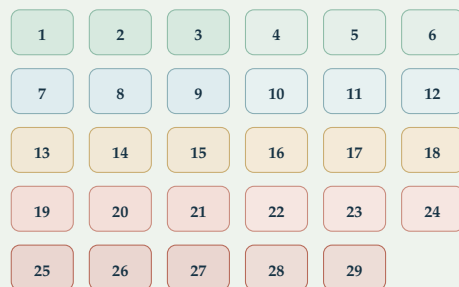
האוויר מזג שנבחרו. ואטמוספירה שמש תחת להתייצב זמן שקיבל מודל אקלים הוא יציב מצב של מקרה בצורה לנדוד מפסיקים הטווח ארוכי הממוצעים אבל הסימולציה, בתוך לשנה ומשנה ליום מיום משתנה עדיין חזקה.

זה שימושי כדי לשאול "איזה אקלים מתאים לתנאים האלה?" וזה שונה מתחזית של המסלול המדויק שבו כדור הארץ האמיתי יעבור ממערכת תנאים אחת לאחרת.

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

Final 20 years averaged
after the climate settles

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

כל אריח הוא ריצת אקלים נפרדת של ExoCAM במשך 70 שנות מודל, כאשר 20 השנים האחרונות חושבו כממוצע. המחקר דגם 29 אקלימים שהתייצבו תחת תנאים שנקבעו מראש של אור שמש ופחמן דו-חמצני; הוא לא סמלך כדור ארץ אחד שמתפתח ברציפות במשך שני מיליארד שנים.

The Clean Paper CC BY 4.0

מקרה קצה ראשון: מספיק פחמן דו-חמצני, יותר מדי חום

בענף הבליה החלשה, פחמן דו-חמצני נשאר קבוע על 400 חלקים למיליון. ככל שהקרנה הסולארית עולה, החום הופך לגורם המגביל.

המאמר משתמש בשני ספי טמפרטורה ממוצעת גלובלית שנלקחו מעבודות קודמות:

- ב-323 קלווין, בערך 50 מעלות צלזיוס כממוצע שנתי גלובלי, העולם נחשב חם מדי עבור רוב צמחי היבשה.

המודל מגיע לסף הזה בעוד כ-1.68 מיליארד שנים.
 • ב-338 קלווין, בערך 65 מעלות צלזיוס כממוצע שנתי גלובלי, העולם נחשב חם מדי עבור כל צמחי היבשה.
 המודל מגיע לסף הזה בעוד כ-1.87 מיליארד שנים.

אלה גבולות ביולוגיים שנבחרו, לא טמפרטורות אוניברסליות שבהן כל אורגניזם פוטוסינתטי בהכרח נכשל. גם ממוצע גלובלי מסתיר הבדלים אזוריים גדולים. המחקר בוחן בנפרד היכן שילובים של טמפרטורה ומים עשויים להישאר מתאימים, אבל תווית על מפת אקלים אינה יכולה לקטלג כל מפלט עתידי או הסתגלות.

מקרה קצה שני: טמפרטורה נסבלת, מעט מדי פחמן דו-חמצני

בענף הבליה החזקה, הטמפרטורה הממוצעת הגלובלית נשמרת על 288 קלווין, בערך 15 מעלות צלזיוס, בעוד שפחמן דו-חמצני אטמוספרי יורד. כאן התשובה תלויה בכמות הפחמן המינימלית שמסלולים פוטוסינתטיים שונים עשויים לנצל.

- בסף המסורתי של 10 חלקים למיליון — 10 מולקולות פחמן דו-חמצני לכל מיליון מולקולות אטמוספירות — הגבול לפוטוסינתזת C4 מגיע בעוד כ-1.35 מיליארד שנים. פוטוסינתזת C4 משמשת צמחים ובהם תירס וקנה סוכר ומרכזת פחמן דו-חמצני סביב האנזים שמקבע אותו.
- שימוש בסף חלופי של 2.9 חלקים למיליון עבור C4, שנדון בעבודות קודמות, מזיז את הגבול לכ-1.64 מיליארד שנים.
- סף ניסויי של 1 חלק למיליון, הקשור לאפשרות התמדה של כמה צמחי CAM — צמחים המשתמשים במטבוליזם חומצה קרסולסי, שמפריד את קליטת הפחמן הדו-חמצני בלילה מן השימוש בו ביום — או צמחי מים המסוגלים להשתמש בביקרבונט מומס, מזיז את הגבול לכ-1.84 מיליארד שנים.

המספר האחרון נושא את הסייג הביולוגי הגדול ביותר. המחברים מכנים במפורש את הגבול של חלק אחד למיליון “ניסויי”. הוא אינו סף הישרדות שנקבע ניסויית עבור כל צמחי CAM או הצמחייה המימית בתנאי כדור הארץ העתידי.

C3, C4 ו-CAM הן אסטרטגיות, לא סולם

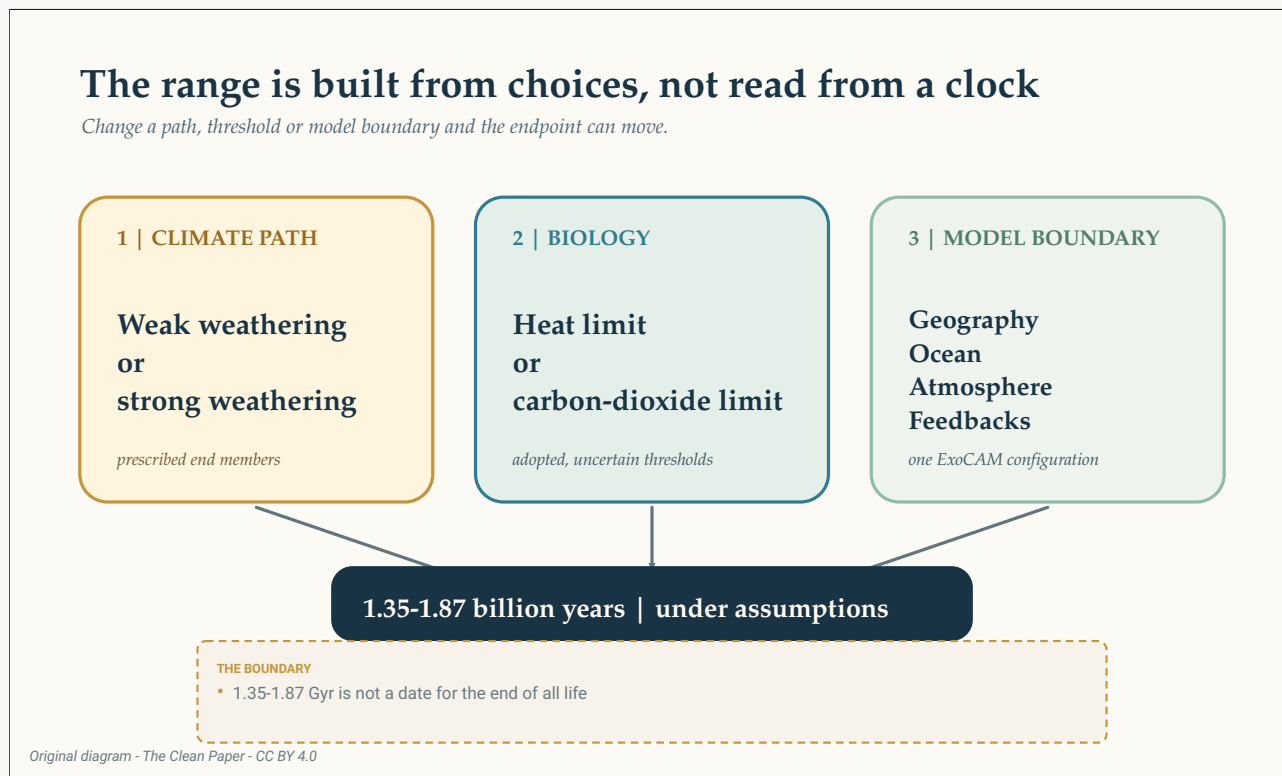
ביותר. הנפוצה היא C3 פוטוסינתזת פחמן. ללכידת שונים ביוכימיים במסלולים משתמשים צמחים שמקבע האנזים סביב דו-חמצני פחמן מרכזת סוכר, וקנה תירס ובהם צמחים המשמשת C4 פוטוסינתזת בין מפריד (CAM) קרסולסי חומצה מטבוליזם נדיר. דו-חמצני פחמן כאשר יותר טוב לעבוד ויכולה פחמן מים. לחסוך רבים לצמחים מסייע וכך ביום, בו לשימוש בלילה פחמן קליטת אלה משפחות של אסטרטגיות עם הבדלים רבים ברמת המין, לא דרגות עוקבות של צמחים “טובים יותר”. ספי הפחמן הדו-חמצני הנמוכים מאוד במאמר הם הנחות שנועדו לחקור גבולות אפשריים, לא הבטחות שמערכת אקולוגית עתידית תפתח להשתמש בהם.

למה 1.86 מיליארד שנים אינו תאריך תפוגה

הערכת הכותרת של המאמר, כ-1.86 מיליארד שנים, היא ממוצע של שני הקצוות העליונים האופטימיים: 1.84 מיליארד שנים בענף המוגבל על ידי פחמן דו-חמצני ו-1.87 מיליארד שנים בענף המוגבל על ידי חום. זהו סיכום

קומפקטי של שני תרחישים שונים. זו אינה תוצאת מודל שלישית בעלת דיוק גבוה יותר, וזה אינו תאריך "ההערכה הטובה ביותר".

אפילו הטווח הרחב יותר של 1.35 עד 1.87 מיליארד שנים אינו נושא הסתברות אחת. הגבול התחתון והעליון תלויים בהנחות שונות על בליה, בספים ביולוגיים שונים ובתצורה אחת של מודל אקלים. הטווח מודד את הבחירות בניסוי לא פחות משהוא מודד זמן.



הטווח של 1.35 עד 1.87 מיליארד שנים מתקבל רק לאחר בחירת מסלול בליה, סף ביולוגי וגבול מודל. זו מפת הנחות, לא שעון שמסתיים בהכחדת כל החיים.

The Clean Paper CC BY 4.0

גבולות אחרים עשויים להגיע קודם

ההערכות הארוכות ביותר לביוספרה הצמחית מתקרבות לגבול נפרד ולא ודאי: חממה לחה או חממה בורחת שעלולות לגרום לאובדן משמעותי של אוקיינוסים. מודלי אקלים חלוקים מאוד בשאלה מתי מצבים כאלה מתחילים תחת קרינה סולארית גדלה, במיוחד רחוק מן התנאים הנוכחיים. כמה הערכות מציבות אותם לפני גבול הפוטוסינתזה האופטימי ביותר.

משמעות הדבר היא שאין לקרוא את הענף העליון כהבטחה שכדור הארץ ישמור על אוקיינוסים, יבשות מוכרות או תנאי פני שטח ראויים לחיים עד 1.87 מיליארד שנים מהיום. המודל גם אינו כולל טקטוניקת לוחות עתידית, שינויים בשטח היבשה, מערכות אקולוגיות מתפתחות או אוקיינוס דינמי מלא. גם החישובים שלו של ספיגה ופליטת אנרגיה אטמוספרית נדחפים למשטרים של אור שמש עז ופחמן דו-חמצני נמוך מאוד, שבהם מודלים שונים מתחילים לסטות זה מזה.

הסתגלות אבולוציונית והתערבות טכנולוגית מופיעות בדיון של המאמר כאפשרויות. הן אינן תוצרים של 29 סימולציות האקלים. המודל אינו מראה שאורגניזמים עתידיים יפתחו מסלול פוטוסינתטי של חלק אחד למיליון, ואינו מראה שציוויליזציה תנהל את האטמוספירה במשך מיליארד שנים.

זו אינה תוצאה על משבר האקלים של היום

ההתבהרות הסולארית פועלת לאורך מאות מיליונים עד מיליארדי שנים. ההתחממות המודרנית הנגרמת בידי בני אדם מגיעה מעלייה מהירה בגזי חממה לאורך עשורים ומאות שנים. אלה אילוצים שונים, בקני זמן שונים באופן קיצוני, שעונים על שאלות שונות.

שום דבר במחקר הזה אינו מחליש את הראיות לשינוי האקלים הנוכחי או מצדיק דחיית פעולה. ביוספירה שאולי תשמור על חלק מן החיים הפוטוסינתטיים תחת תרחיש מודל מרוחק אינה זהה לאקלים שבו החברות והמערכות האקולוגיות של היום בטוחות.

המאמר חשוב משום שהוא הופך שאלה רחוקה לממושמת יותר. הוא מראה שמודלים מוקדמים ופשוטים יותר אולי התחממו יותר מדי כאשר אור השמש עלה ופחמן דו-חמצני נשאר קבוע, ושייתכן שלחיים פוטוסינתטיים יש יותר דרכי התמדה מסך פחמן קונוי יחיד. הוא גם מראה מדוע כל חלק נוסף של מיליארד שנים מגיע עם שרשרת של הנחות.

השמש שמזינה עלה משתנה לאט. השאלה אם כדור הארץ יישאר ירוק עוד 1.35, 1.87 או מספר אחר של מיליארדי שנים תלויה בכך שסלעים, מים, אטמוספירה וחיים יגיבו יחד. התוצאה הכנה אינה תאריך. זו תמונה רחבה יותר של הפשרה.

בקצרה

מחקר אקלים תלת-ממדי שואל כמה זמן הביוספירה הצמחית – הפוטוסינתטית – של כדור הארץ עשויה להתמיד כאשר השמש מתבהרת לאט. החוקרים חישבו 29 אקלימים נפרדים במצב יציב ועקבו דרכם אחר שני מקרי קצה להמחשה. עם בליה חלשה ופחמן דו-חמצני קבוע על 400 חלקים למיליון, גבולות חום שנבחרו לצמחי יבשה מגיעים בעוד כ-1.68 ו-1.87 מיליארד שנים. עם בליה חזקה וטמפרטורה גלובלית ממוצעת קבועה על 288 קלווין, בערך 15 מעלות צלזיוס, גבולות פחמן דו-חמצני שנבחרו לפוטוסינתזה מגיעים בעוד כ-1.35, 1.64, ובשימוש בסף ניסויי, 1.84 מיליארד שנים. המספר המצוטט לעיתים קרובות, 1.86 מיליארד שנים, הוא רק הממוצע המעוגל של שני הקצוות העליונים האופטימיים. אלה טווחי מודל התלויים בתרחישים, לא תאריך שבו כדור הארץ, האנושות או כל החיים יסתיימו. המודל משתמש במסלולים שנקבעו מראש, בגאוגרפיה הנוכחית, באוקיינוס slab וללא צימוד מפורש בין קרקע-צמחייה או אקלים-בליה, וההערכות הארוכות ביותר מתקרבות לגבולות לא ודאיים של חממה ואובדן אוקיינוסים.

בדיקה מפוכחת

מה המאמר מראה: בתצורת ExoCAM הזו, אקלימים תלת-ממדיים בדרך כלל מתחממים פחות תחת אור שמש גובר ופחמן דו-חמצני קבוע מן המודלים הפשוטים ששימשו להשוואה. בשני מקרי קצה של בליה שנקבעו מראש ובכמה ספים ביולוגיים שנבחרו, גבולות הביוספירה הצמחית נופלים בין בערך 1.35 ל-1.87 מיליארד שנים מהיום.

מה סביר אך לא מבוסס: שכמה צמחי CAM או צמחי מים המשתמשים בביקרבונט מומס יוכלו לקיים פוטוסינתזה ליד חלק אחד למיליון פחמן דו-חמצני אטמוספרי; שהסתגלות או טכנולוגיה יוכלו להאריך עוד את החיים הפוטוסינתטיים; ושהמסלול האמיתי של אקלים-בליה יישאר בין שני מקרי הקצה של המודל.

מה הוא אינו מראה: תאריך קבוע לסוף כל הצמחים, כל החיים, הציוויליזציה האנושית, אוקיינוסי כדור הארץ או כוכב הלכת; סימולציה רציפה אחת של שני מיליארד השנים הבאות; או כל סיבה להפחית בחומרת שינוי האקלים הנגרם בידי בני אדם כיום.

המגבלות העיקריות: 29 מקרי מצב-יציב ממשפחת מודל אקלים אחת; מסלולי בליה שנקבעו מראש במקום צימוד דינמי; גאוגרפיה נוכחית; אוקיינוס; slab מתאן קבוע; נטיית ציר ואקסצנטריות אפס; ללא קרקעות, צמחייה או משוב ביוספרי מפורשים; ספי חום ופחמן דו-חמצני לא ודאיים; ומחלוקת רחבה בין מודלים ליד תנאי חממה לחה ובורחת.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? ביטחון גבוה שהמחקר מרחיב את טווח המודל הסביר ומזהה את ההנחות ששולטות בו. ביטחון בינוני בטווח המספרי כמסגרת שימושית בתוך המודל הזה. ביטחון נמוך בכל תאריך מדויק, מפני שהקצוות הרחוקים ביותר תלויים במסלולי אקלים קיצוניים בכוונה ובביולוגיה לא ודאית.

מקורות

Atmospheres Research: Geophysical of Journal Biosphere, Vegetative the of Lifetime Maximum Wolf, & Haqq-Misra
(2026) e2025JD045586, 131
<https://doi.org/10.1029/2025JD045586>

16584870 record Zenodo Data, Model Biosphere: Vegetative the of Lifetime Maximum Wolf, & Haqq-Misra
<https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870>