The Clean Paper

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

Как долго Земля сможет оставаться зелёной? Климатическая модель даёт диапазоны, а не дату конца света

Двадцать девять трёхмерных климатических симуляций помещают разные пределы фотосинтетической биосферы Земли примерно между 1,35 и 1,87 миллиарда лет от настоящего времени. Значения зависят от намеренно упрощённых траекторий выветривания пород, жары и минимальных концентраций углекислого газа, которые могут использовать растения. Они не предсказывают конец всех растений, всей жизни, цивилизации или планеты.

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

Как долго Земля сможет оставаться зелёной? Климатическая модель даёт диапазоны, а не дату конца света

Жизнь листа держится на узком наборе условий. Ему нужны свет, вода, углекислый газ и температура, которую способна выдержать его химия. На протяжении человеческой жизни Солнце кажется неизменной частью этого соглашения. На протяжении миллиарда лет — уже нет.

По мере старения на главной последовательности Солнце медленно становится ярче. Больше солнечного света нагревает Землю, но у планеты есть долговременная ответная реакция: взаимодействия дождевой воды, углекислого газа и силикатных пород могут удалять углекислый газ из атмосферы. Это ослабляет парниковый эффект и компенсирует часть потепления. Однако тот же механизм, который охлаждает планету, со временем способен лишить фотосинтезирующие организмы углерода, из которого они строят живую ткань.

Новая статья в Journal of Geophysical Research: Atmospheres спрашивает, какое ограничение может наступить первым: слишком сильная жара или слишком мало углекислого газа. Ответ — не дата смерти Земли. В двух намеренно упрощённых траекториях будущего принятые пределы фотосинтетической жизни находятся примерно между **1,35 и 1,87 миллиарда лет от настоящего времени**.

Этот диапазон относится к **растительной биосфере**: части живой системы Земли, поддерживаемой фотосинтезирующими организмами, особенно растениями и другими формами жизни, превращающими свет и углекислый газ в биологический материал. Это не прогноз для каждого микроорганизма. Не срок существования человеческой цивилизации. И не срок существования планеты.

У планетарного термостата две неопределённые настройки

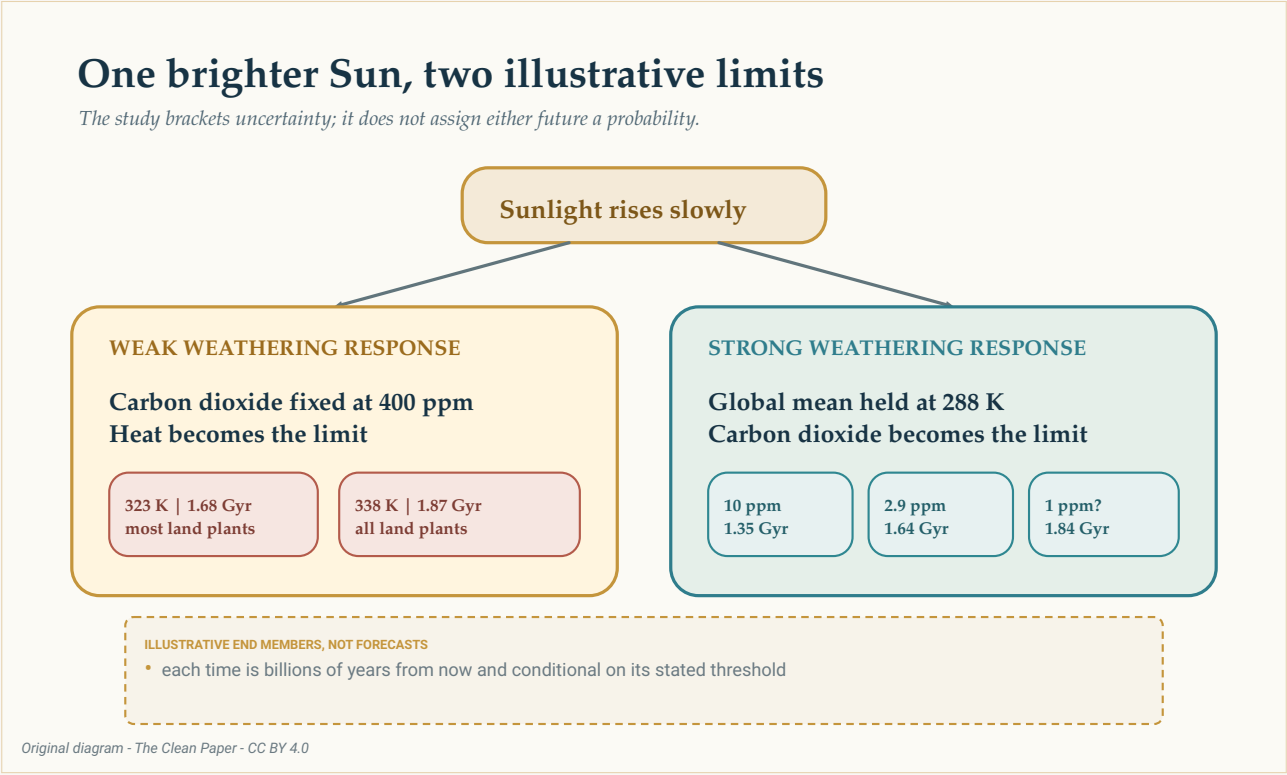
Главная неопределённость — **силикатное выветривание**. Углекислый газ растворяется в дождевой воде, реагирует с силикатными породами и в конечном счёте переносится к океанам и осадочным отложениям. На геологических масштабах времени вулканы возвращают углекислый газ. Вместе эти процессы образуют часть карбонатно-силикатного цикла, который часто описывают как планетарный термостат.

В более тёплом и влажном мире выветривание может ускоряться и быстрее удалять углекислый газ. Но учёные не знают, насколько сильно этот отклик будет управлять Землёй при более ярком будущем Солнце. Поэтому Джейкоб Хакк-Мисра и Эрик Вулф не выбрали одну якобы правильную траекторию. Они смоделировали два **крайних сценария** — намеренно экстремальные случаи, ограничивающие область неопределённости.

- В **сценарии слабого выветривания** концентрация атмосферного углекислого газа остаётся на уровне 400 частей на миллион, а ярче становящееся Солнце повышает температуру.
- В **сценарии сильного выветривания** глобальная средняя температура поверхности остаётся равной 288 кельвинам, то есть примерно 15 градусам Цельсия, а по мере усиления солнечного излучения углекислый газ удаляется из атмосферы.

Ни одна ветвь не представлена как реальное будущее Земли. Первая спрашивает, что сделает жара, если углекислого газа останется много. Вторая — что сделает углеродное голодание, если выветривание удержит глобальную температуру возле современного среднего значения.

> **Как выветривание может действовать подобно термостату?**
>
> Аналогия относится к обратной связи, а не к буквальной ручке управления. Если более тёплый климат ускоряет химическое выветривание, больше атмосферного углекислого газа может перейти в растворённое вещество, минералы и осадки. Удаление этого парникового газа противодействует части исходного потепления. На очень больших временных масштабах вулканическая дегазация возвращает углекислый газ.
> Сила каждого звена зависит от осадков, обнажённых пород, эрозии, биологии, тектоники и химии океана. Поэтому статья проверяет предельные отклики, а не рассматривает термостат как известную машину.



Статья ограничивает неопределённое будущее двумя иллюстративными крайними сценариями. Если выветривание реагирует слабо, растущая жара достигает принятых порогов для наземных растений. Если оно реагирует сильно, падающая концентрация углекислого газа достигает принятых порогов фотосинтеза. Это условные ветви модели, а не вероятности или даты обратного отсчёта.

The Clean Paper CC BY 4.0

Двадцать девять установившихся модельных миров, а не один фильм длиной два миллиарда лет

Исследователи использовали ExoCAM, трёхмерную глобальную климатическую модель, чтобы рассчитать **29 стационарных климатов** при разных сочетаниях более сильного солнечного излучения и меньшего количества углекислого газа. Каждый случай рассчитывался 70 модельных лет. Здесь один модельный год — один смоделированный годовой цикл при неизменных условиях: это вычислительное время, необходимое для установления искусственного климата, а не один шаг погодового прогноза будущего Земли. После того как смоделированный климат успевал установиться, усреднялись последние 20 лет.

Эти 29 случаев — отдельные модельные миры. Каждый прогон представляет одну точку сетки и отвечает на вопрос: «Какой установившийся климат соответствует выбранной паре солнечного излучения и углекислого газа?» Компьютер не брал сегодняшнюю Землю и не развивал непрерывно её атмосферу, породы, океаны и живые организмы на протяжении следующих двух миллиардов лет. Вместо этого авторы провели две схематические траектории выветривания через заранее рассчитанные точки; путь между точками отдельно не моделировался.

В таблице воспроизведены сочетания солнечного излучения и углекислого газа из официального архива модельных данных. Идентификаторы случаев добавлены здесь для удобства чтения в порядке архива. **S/S0** — относительная солнечная постоянная: поступающая солнечная энергия в модели, делённая на её современное значение S0. Значение 1,2 поэтому означает на 20 процентов больше поступающей солнечной энергии, чем сегодня. **CO2 (ppm)** — доля атмосферного углекислого газа в молекулах на миллион молекул атмосферы.

Номер случая	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

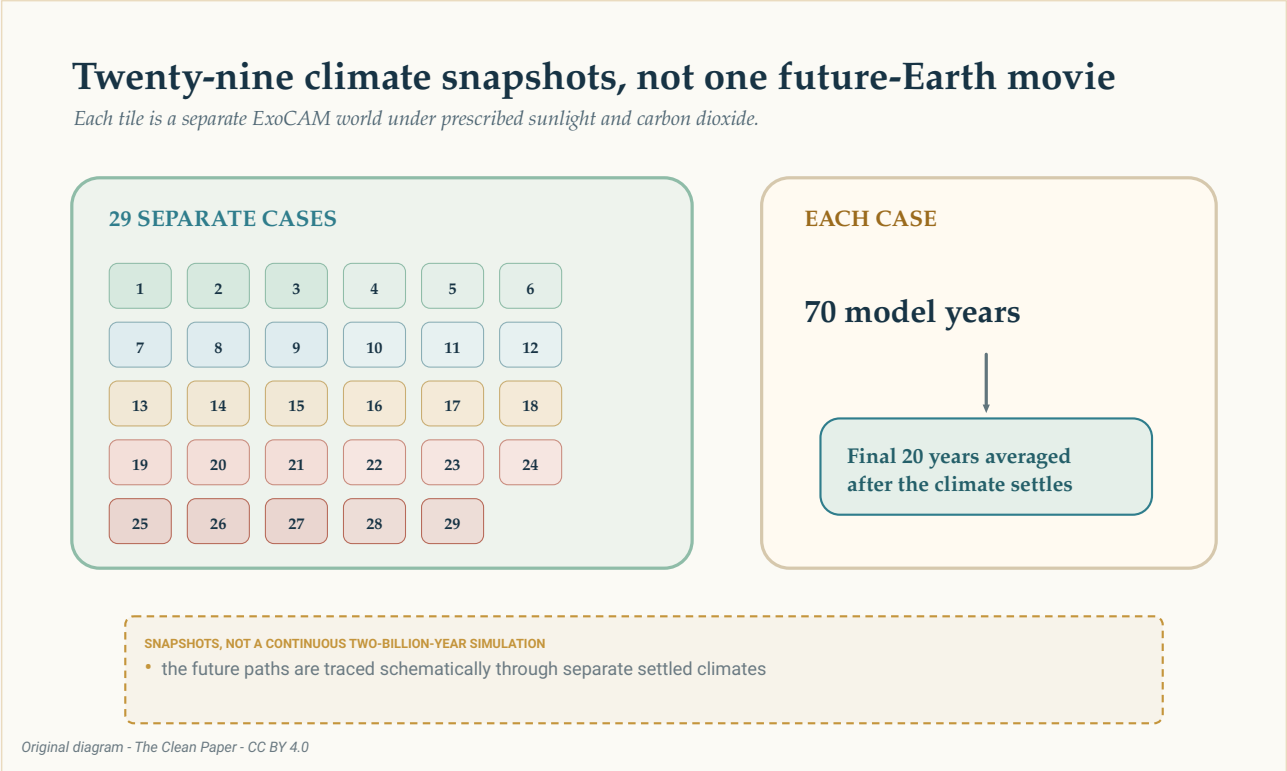
Номер случая	S/S0	CO2 (ppm)
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

Модельная Земля узнаваема, но намеренно ограничена. Она имеет размеры Земли и современную географию. В ней используется упрощённый океан-слой вместо полностью циркулирующего океана, атмосферное давление задано примерно равным современному земному значению — одному бару, а количество метана фиксировано. Орбита совершенно круговая — эксцентриситет равен нулю, — а ось вращения не наклонена — нулевой угол наклона. Явных почв, растительности и обратной связи со меняющейся биосферой в ней нет. Самое важное: климатическая модель динамически не связана с моделью выветривания пород. Иными словами, ExoCAM не рассчитывает выветривание, не использует его для обновления концентрации углекислого газа, а затем не запускает следующий климат в цикле обратной связи. Исследователи задали две предельные траектории и провели их через климатическую сетку из 29 случаев.

Что означает «стационарное состояние» в климатической модели?

Случай стационарного состояния — это модельный климат, которому позволили установиться при одном выбранном Солнце и составе атмосферы. Погода внутри симуляции всё ещё меняется день ото дня и год от года, но её долгосрочные средние перестают заметно дрейфовать.
Это полезно для вопроса «какой климат соответствует этим условиям?». Но это не то же самое, что предсказать точный путь, по которому реальная Земля перейдёт

> от одного набора условий к следующему.



Каждая плитка — отдельный прогон ExoCAM продолжительностью 70 модельных лет, причём последние 20 лет усреднялись. Исследование выбрало 29 установившихся климатов при заданных условиях солнечного излучения и углекислого газа; оно не моделировало одну непрерывно меняющуюся Землю в течение двух миллиардов лет.

The Clean Paper CC BY 4.0

Крайний сценарий первый: углекислого газа достаточно, но слишком жарко

В ветви слабого выветривания содержание углекислого газа остаётся фиксированным на уровне 400 частей на миллион. По мере роста солнечного потока ограничивающим фактором становится жара.

В статье используются два порога глобальной средней температуры из предыдущих работ:

- При **323 кельвинах**, то есть примерно **50 градусах Цельсия** в качестве глобального среднегодового значения, мир считается слишком жарким для большинства наземных растений. Модель достигает этого порога примерно через **1,68 миллиарда**

лет.
- При **338 кельвинах**, то есть примерно **65 градусах Цельсия** в качестве глобального среднегодового значения, мир считается слишком жарким для всех наземных растений. Модель достигает этого порога примерно через **1,87 миллиарда лет**.

Это принятые биологические пределы, а не универсальные температуры, при которых обязательно откажет каждый фотосинтезирующий организм. Глобальное среднее также скрывает большие региональные различия. Исследование отдельно рассматривает, где сочетания температуры и воды могут оставаться подходящими, но подпись на климатической карте не может перечислить каждое будущее убежище или приспособление.

Крайний сценарий второй: температура терпима, но углекислого газа слишком мало

В ветви сильного выветривания глобальная средняя температура удерживается на уровне 288 кельвинов, то есть около 15 градусов Цельсия, а концентрация атмосферного углекислого газа падает. Здесь ответ зависит от того, насколько малое количество углерода могут использовать разные пути фотосинтеза.

- При традиционном пороге **10 частей на миллион** — 10 молекулах углекислого газа на миллион молекул атмосферы — предел для C4-фотосинтеза наступает примерно через **1,35 миллиарда лет**. C4-фотосинтез используют, в частности, кукуруза и сахарный тростник; он концентрирует углекислый газ возле фермента, который его фиксирует.
- Использование альтернативного порога C4 в **2,9 части на миллион**, обсуждавшегося в предыдущих работах, сдвигает предел примерно к **1,64 миллиарда лет**.
- Предварительный порог **1 часть на миллион**, связанный с возможным сохранением некоторых CAM-растений — растений с метаболизмом крассуловых кислот, разделяющим поглощение углекислого газа ночью и его использование днём, — или водных растений, способных использовать растворённый бикарбонат, сдвигает предел примерно к **1,84 миллиарда лет**.

Последнее число сопровождается самой большой биологической оговоркой. Авторы прямо называют порог в одну часть на миллион предварительным. Это не экспериментально установленный порог выживания для всех CAM-растений или водной растительности в условиях будущей Земли.

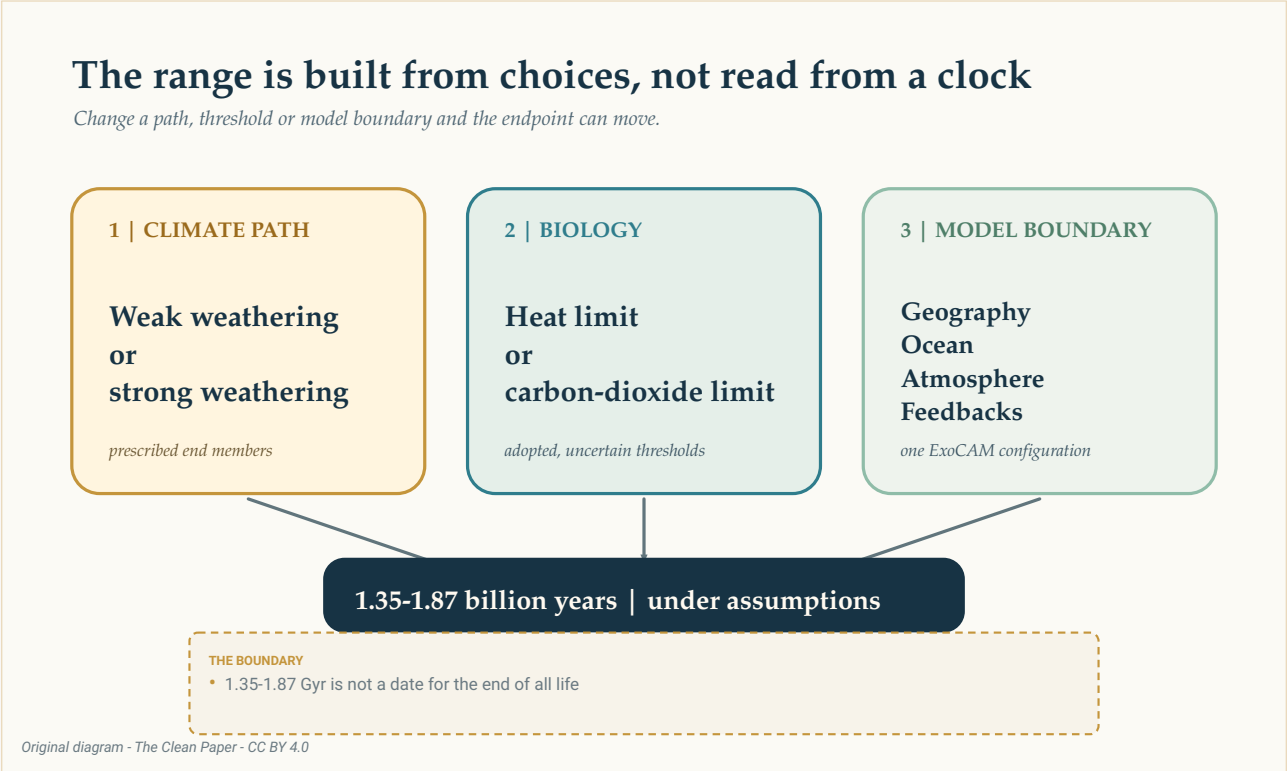
> **C3, C4 и CAM — стратегии, а не лестница**
>
> Растения используют разные биохимические пути захвата углерода. **C3-**

> **фотосинтез** наиболее распространён. **C4-фотосинтез**, используемый, в частности, кукурузой и сахарным тростником, концентрирует углекислый газ вокруг фермента, фиксирующего углерод, и может лучше работать при его дефиците. **Метаболизм крассуловых кислот (CAM)** разделяет захват и использование углерода между ночью и днём, помогая многим растениям экономить воду.
> Это семейства стратегий с множеством различий между видами, а не последовательные ступени «лучших» растений. Очень низкие пороги углекислого газа в статье — допущения для исследования возможных пределов, а не гарантии того, что будущая экосистема эволюционирует для их использования.

Почему 1,86 миллиарда лет — не срок годности

Заглавная оценка статьи около **1,86 миллиарда лет** — это среднее двух оптимистичных верхних конечных точек: 1,84 миллиарда лет в ветви ограничения углекислым газом и 1,87 миллиарда лет в ветви ограничения жарой. Это компактное резюме двух разных сценариев. Это не третий результат модели с большей точностью и не наилучшая оценка даты.

Даже более широкий диапазон от 1,35 до 1,87 миллиарда лет не имеет одной вероятности. Его нижняя и верхняя границы зависят от разных предположений о выветривании, разных биологических порогов и одной конфигурации климатической модели. Диапазон измеряет выборы в эксперименте не меньше, чем время.



Диапазон от 1,35 до 1,87 миллиарда лет возникает только после выбора траектории выветривания, биологического порога и границ модели. Это карта допущений, а не часы, отсчитывающие время до исчезновения всей жизни.

The Clean Paper CC BY 4.0

Другие пределы могут наступить раньше

Самые длинные оценки существования растительной биосферы приближаются к отдельной и неопределённой границе: влажному или неуправляемому парниковому эффекту, способному привести к большой потере океана. Климатические модели существенно расходятся в том, когда такие состояния начинаются при усилении солнечного излучения, особенно далеко от современных условий. Некоторые оценки помещают их раньше самого оптимистичного предела фотосинтеза.

Поэтому верхнюю ветвь нельзя читать как обещание, что Земля сохранит океаны, знакомые континенты или пригодные для жизни поверхностные условия до 1,87 миллиарда лет от настоящего времени. Модель также не включает будущую тектонику плит, изменения площади суши, эволюционирующие экосистемы или полностью динамический океан. Её расчёты поглощения и испускания энергии атмосферой распространяются на режимы интенсивного солнечного излучения и крайне низкого углекислого газа, где разные модели расходятся.

Эволюционная адаптация и технологическое вмешательство появляются в обсуждении статьи как возможности. Они не являются результатами 29 климатических симуляций.

Модель не показывает, как будущие организмы развивают путь фотосинтеза при одной части углекислого газа на миллион, и не показывает цивилизацию, управляющую атмосферой миллиард лет.

Это не результат о современном климатическом кризисе

Усиление солнечной светимости действует на протяжении сотен миллионов и миллиардов лет. Современное потепление, вызванное человеком, связано с быстрым увеличением концентрации парниковых газов за десятилетия и столетия. Это разные воздействия на радикально разных временных масштабах, отвечающие на разные вопросы.

Ничто в этом исследовании не ослабляет доказательства нынешнего изменения климата и не служит аргументом в пользу отсрочки действий. Биосфера, которая в одном далёком модельном сценарии может сохранять некоторую фотосинтетическую жизнь, — не то же самое, что климат, в котором современные общества и экосистемы остаются в безопасности.

Статья ценна тем, что делает далёкий вопрос более строгим. Она показывает, что более ранние упрощённые модели могли давать слишком сильное потепление, когда солнечное излучение росло при фиксированном углекислом газе, и что у фотосинтетической жизни может быть больше путей к сохранению, чем предполагает один канонический углеродный порог. Она также показывает, почему каждая дополнительная доля миллиарда лет привязана к цепочке допущений.

Солнце, питающее лист, медленно меняется. Останется ли Земля зелёной ещё 1,35, 1,87 или иное число миллиардов лет, зависит от совместной реакции пород, воды, атмосферы и жизни. Честный результат — не дата. Это более широкий взгляд на условия сделки.

Краткий итог

Трёхмерное климатическое исследование спрашивает, как долго растительная — фотосинтетическая — биосфера Земли может сохраняться по мере медленного усиления яркости Солнца. Исследователи рассчитали 29 отдельных стационарных климатов и провели через них два иллюстративных крайних сценария. При слабом выветривании и фиксированном уровне углекислого газа 400 частей на миллион принятые тепловые пределы для наземных растений наступают примерно через 1,68 и 1,87 миллиарда лет. При сильном выветривании и фиксированной глобальной средней температуре 288 кельвинов, около 15 градусов Цельсия, принятые пределы углекислого газа для фотосинтеза наступают примерно через 1,35, 1,64 и, при использовании предварительного порога, 1,84 миллиарда лет. Часто цитируемые 1,86 миллиарда лет

— лишь округлённое среднее двух оптимистичных верхних конечных точек. Это зависящие от сценария модельные диапазоны, а не дата конца Земли, человечества или всей жизни. В модели используются заданные траектории, современная география, океан-слой и отсутствует явная связь почва–растительность или климат–выветривание; самые длинные оценки приближаются к неопределённым границам парникового эффекта и потери океана.

Проверка без прикрас

Что показывает статья: В этой конфигурации ExoCAM трёхмерные климаты при усилении солнечного излучения и фиксированном углекислом газе обычно нагреваются меньше, чем упрощённые модели, использованные для сравнения. При двух заданных крайних сценариях выветривания и нескольких принятых биологических порогах пределы растительной биосферы находятся примерно между 1,35 и 1,87 миллиарда лет от настоящего времени.

Что правдоподобно, но не установлено: Что некоторые CAM-растения или водные растения, использующие растворённый бикарбонат, смогут поддерживать фотосинтез при концентрации атмосферного углекислого газа около одной части на миллион; что адаптация или технология способны дополнительно продлить фотосинтетическую жизнь; и что реальная траектория климат–выветривание останется между двумя крайними сценариями модели.

Чего исследование не показывает: Фиксированную дату конца всех растений, всей жизни, человеческой цивилизации, океанов Земли или планеты; одну непрерывную симуляцию следующих двух миллиардов лет; или какую-либо причину недооценивать нынешнее изменение климата, вызванное человеком.

Основные ограничения: Двадцать девять случаев стационарного состояния из одного семейства климатических моделей; заданные, а не динамически связанные траектории выветривания; современная география; океан-слой; фиксированный метан; нулевые наклон оси и эксцентриситет; отсутствие явных почв, растительности и обратной связи биосферы; неопределённые пороги температуры и концентрации углекислого газа; большие расхождения моделей возле условий влажного и неуправляемого парникового эффекта.

Какой должна быть уверенность обычного читателя? Высокая уверенность в том, что исследование расширяет правдоподобный модельный диапазон и выявляет управляющие им допущения. Умеренная уверенность в численном интервале как полезных границах внутри этой модели. Низкая уверенность в любой точной дате, поскольку самые далёкие конечные точки зависят от намеренно экстремальных климатических траекторий и неопределённой биологии.

Источники

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