The Clean Paper

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

# Jak dlouho může Země zůstat zelená? Klimatický model nabízí rozpětí, ne datum zkázy

*Dvacet devět trojrozměrných klimatických simulací klade různé limity fotosyntetické biosféry Země přibližně mezi 1,35 a 1,87 miliardy let od současnosti. Hodnoty závisí na záměrně zjednodušených drahách zvětrávání hornin, tepla a nejnižších koncentrací oxidu uhličitého, které by rostliny mohly využít. Nepředpovídají konec všech rostlin, všeho života, civilizace ani planety.*

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

# Jak dlouho může Země zůstat zelená? Klimatický model nabízí rozpětí, ne datum zkázy

List žije uvnitř úzké dohody. Potřebuje světlo, vodu, oxid uhličitý a teplotu, kterou jeho chemie snese. V měřítku lidského života se Slunce zdá být pevnou součástí této dohody. V měřítku miliardy let jí není.

Jak Slunce stárne na hlavní posloupnosti, pomalu se zjasňuje. Více slunečního záření Zemi ohřívá, planeta však má dlouhodobou reakci: reakce mezi dešťovou vodou, oxidem uhličitým a silikátovými horninami mohou oxid uhličitý z atmosféry odstraňovat. Tím se zeslabuje skleníkový efekt a část oteplení se kompenzuje. Stejná reakce, která planetu ochlazuje, může nakonec připravit fotosyntetické organismy o uhlík používaný k tvorbě živé tkáně.

Nový článek v Journal of Geophysical Research: Atmospheres se ptá, který limit může přijít dříve: příliš mnoho tepla, nebo příliš málo oxidu uhličitého. Odpovědí není datum smrti Země. Ve dvou záměrně zjednodušených budoucích drahách leží použité limity fotosyntetického života přibližně mezi **1,35 a 1,87 miliardy let od současnosti**.

Toto rozpětí se týká **vegetační biosféry**: části živého systému Země udržované fotosyntetickými organismy, zejména rostlinami a dalšími formami života, které přeměňují světlo a oxid uhličitý na biologický materiál. Není to předpověď pro každý mikrob. Není to délka života lidské civilizace. Není to délka života planety.

## Planetární termostat má dvě nejistá nastavení

Ústřední nejistotou je **zvětrávání silikátů**. Oxid uhličitý se rozpouští v dešťové vodě, reaguje se silikátovými horninami a nakonec je odnášen směrem k oceánům a sedimentům. Sopky oxid uhličitý v geologickém čase vracejí. Tyto procesy společně tvoří část karbonátovo-silikátového cyklu, často popisovaného jako planetární termostat.

V teplejším a vlhčím světě se může zvětrávání zrychlit a oxid uhličitý odstraňovat rychleji. Vědci však nevědí, jak silně bude tato reakce řídit Zemi pod jasnějším budoucím Sluncem. Jacob Haqq-Misra a Eric Wolf proto nezvolili jednu údajně správnou dráhu. Modelovali dva **mezní případy**: záměrně krajní scénáře používané k ohraničení nejistoty.

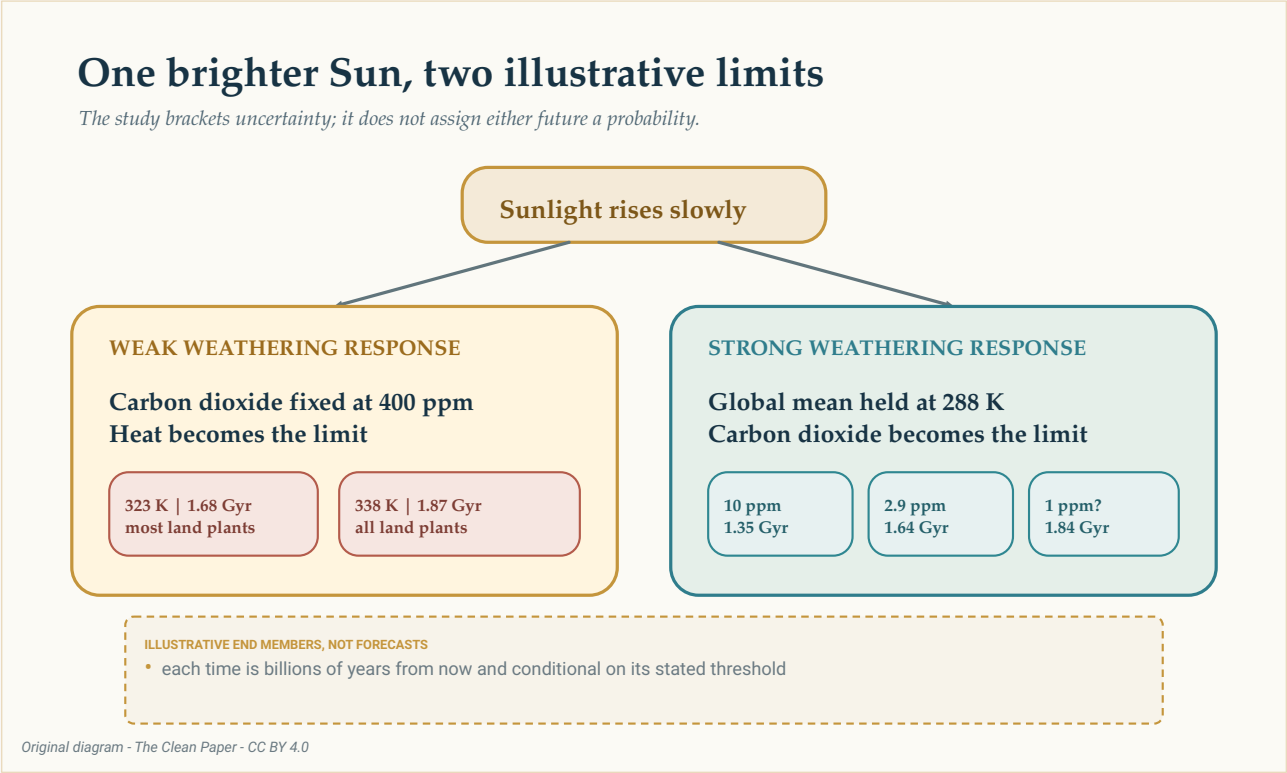
- V **mezním případu slabého zvětrávání** zůstává atmosférický oxid uhličitý na 400 částech na milion, zatímco zjasňující se Slunce zvyšuje teplotu.
- V **mezním případu silného zvětrávání** zůstává globální průměrná povrchová teplota na 288 kelvinech, přibližně 15 stupních Celsia, zatímco s rostoucím slunečním zářením oxid uhličitý ubývá.

Ani jedna větev není prezentována jako skutečná budoucnost Země. První se ptá, co by udělalo teplo, kdyby oxid uhličitý zůstal vysoký. Druhá se ptá, co by způsobilo uhlíkové hladovění, kdyby zvětrávání

udrželo globální teplotu blízko dnešního průměru.

### Jak může zvětrávání fungovat jako termostat?

Přirovnání se týká zpětné vazby, nikoli doslovného ovladače. Když teplejší klima urychlí chemické zvětrávání, více atmosférického oxidu uhličitého může skončit v rozpuštěném materiálu, minerálech a sedimentech. Odstranění tohoto skleníkového plynu působí proti části původního oteplení. V geologicky dlouhých obdobích oxid uhličitý vrací vulkanické odplyňování.
Síla jednotlivých vazeb závisí na srážkách, odkrytých horninách, erozi, biologii, tektonice a chemii oceánu. Proto článek testuje mezní reakce, místo aby s termostatem zacházel jako se známým strojem.




Článek ohraničuje nejistou budoucnost dvěma ilustrativními mezními případy. Pokud zvětrávání reaguje slabě, rostoucí teplo dosáhne použitých prahů pro suchozemské rostliny. Pokud reaguje silně, klesající oxid uhličitý dosáhne použitých prahů fotosyntézy. Jde o podmíněné větve modelu, nikoli pravděpodobnosti nebo odpočítávání.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Dvacet devět ustálených modelových světů, ne jeden dvoumiliardový film

Výzkumníci použili ExoCAM, trojrozměrný globální klimatický model, k výpočtu **29 ustálených klimatických stavů** napříč kombinacemi silnějšího slunečního záření a nižšího oxidu uhličitého. Každý případ běžel 70 modelových let. Jeden modelový rok zde znamená jeden simulovaný roční cyklus za pevných podmínek: je to doba běhu používaná k ustálení umělého klimatu, nikoli jeden krok v předpovědi budoucnosti Země rok po roce. Po ustálení simulovaného klimatu bylo zprůměrováno posledních 20 let.

Těchto 29 případů představuje samostatné modelové světy. Každý běh je jedním bodem v mřížce a odpovídá na otázku: „Jaké ustálené klima odpovídá této zvolené dvojici slunečního záření a oxidu uhličitého?“ Počítač nezačal dnešní Zemí a nepokračoval v plynulém vývoji atmosféry, hornin, oceánů a živých organismů po následující dvě miliardy let. Autoři místo toho vedli dvě schematické dráhy zvětrávání přes předpočítané body; cesta mezi body sama simulována nebyla.

Tabulka reprodukuje kombinace slunečního záření a oxidu uhličitého z oficiálního archivu modelových dat. Identifikátory případů byly doplněny zde pro snazší čtení v pořadí archivu. **S/S0** je relativní sluneční konstanta: příchozí sluneční energie použitá v modelu dělená její dnešní hodnotou S0. Hodnota 1,2 tedy znamená o 20 procent více příchozí sluneční energie než dnes. **CO2 (ppm)** je směšovací poměr oxidu uhličitého v atmosféře v molekulách na milion molekul atmosféry.

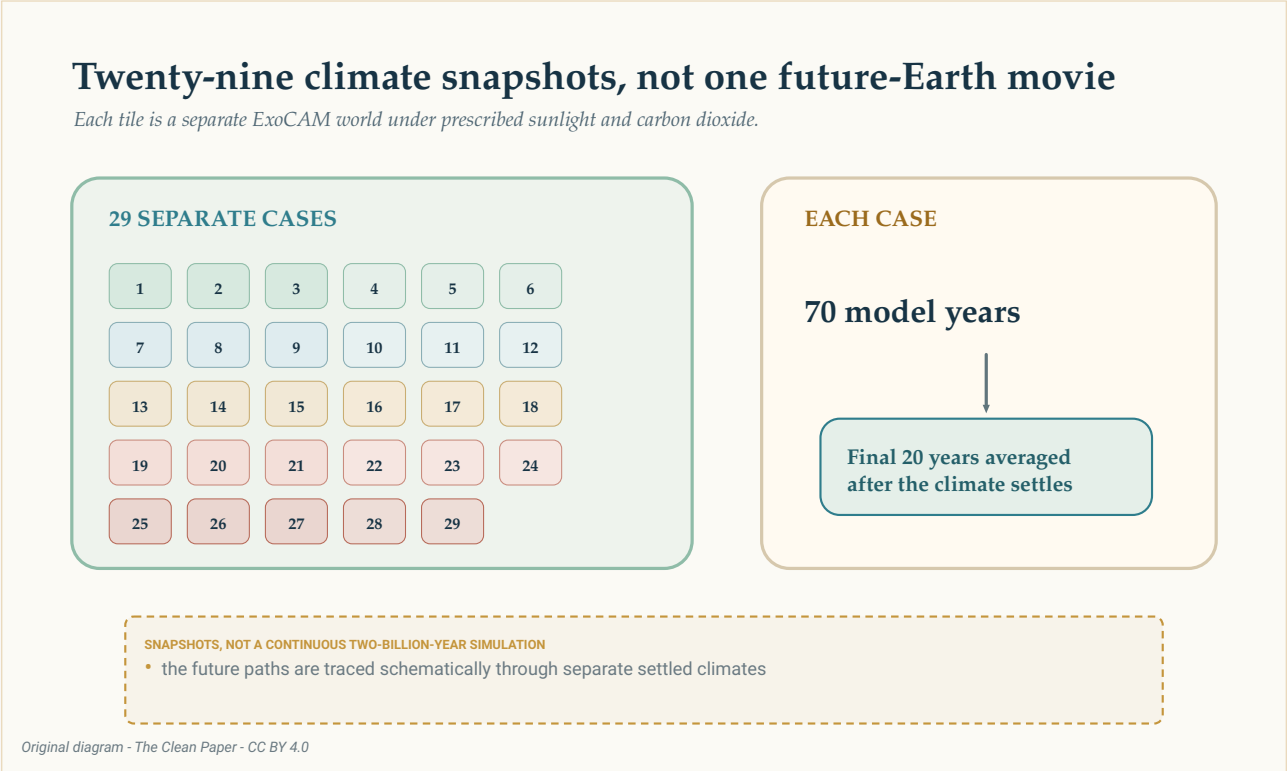
| ID případu | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---:|---:|---:|
| 1 | 1.0 | 400 |
| 2 | 1.0 | 180 |
| 3 | 1.0 | 11.25 |
| 4 | 1.0 | 1.40625 |
| 5 | 1.044 | 400 |
| 6 | 1.044 | 180 |
| 7 | 1.044 | 135 |
| 8 | 1.044 | 11.25 |
| 9 | 1.044 | 1.40625 |
| 10 | 1.081 | 400 |
| 11 | 1.081 | 180 |
| 12 | 1.081 | 11.25 |
| 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 |

| ID případu | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---|---|---|
| 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 |

Modelová Země je rozpoznatelná, ale záměrně omezená. Má velikost Země a používá dnešní geografii. Místo plně cirkulujícího oceánu má zjednodušený deskový oceán, atmosférický tlak je nastaven přibližně na dnešní hodnotu Země (jeden bar) a metan je pevný. Oběžná dráha je dokonale kruhová (nulová excentricita) a rotační osa nemá sklon (nulová obliquita). Model neobsahuje explicitní půdy, vegetaci ani zpětnou vazbu měnící se biosféry. Nejdůležitější je, že klimatický model není dynamicky propojen s modelem zvětrávání hornin. Jinými slovy ExoCAM nevypočítá zvětrávání, nepoužije je k aktualizaci oxidu uhličitého a poté nespustí další klima ve zpětnovazební smyčce. Výzkumníci místo toho předepsali dvě mezní dráhy a vedli je přes mřížku 29 klimatických případů.

**Co znamená „ustálený stav“ v klimatickém modelu?**

Případ v ustáleném stavu je modelové klima, kterému bylo umožněno ustálit se pod jedním zvoleným Sluncem a atmosférou. Počasí se uvnitř simulace stále mění ze dne na den a z roku na rok, ale jeho dlouhodobé průměry přestanou výrazně driftovat.
Je to užitečné pro otázku „jaké klima odpovídá těmto podmínkám?“. Liší se to od předpovědi přesné cesty, po níž se skutečná Země přesune z jedné sady podmínek do další.




Každá dlaždice je samostatný klimatický běh ExoCAM trvající 70 modelových let, přičemž posledních 20 let bylo zprůměrováno. Studie vzorkovala 29 ustálených klimat při předepsaných podmínkách slunečního záření a oxidu uhličitého; nesimulovala jednu plynule se vyvíjející Zemi po dvě miliardy let.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Mezní případ jedna: dost oxidu uhličitého, příliš mnoho tepla

Ve větvi slabého zvětrávání zůstává oxid uhličitý pevně na 400 částech na milion. S rostoucím slunečním příkonem se omezujícím faktorem stává teplo.

Článek používá dva prahy globální průměrné teploty převzaté z předchozí práce:

- Při **323 kelvinech**, tedy přibližně **50 stupních Celsia** jako globálním ročním průměru, je svět považován za příliš horký pro většinu suchozemských rostlin. Model dosahuje tohoto prahu přibližně za **1,68 miliardy let**.
- Při **338 kelvinech**, tedy přibližně **65 stupních Celsia** jako globálním ročním průměru, je svět považován za příliš horký pro všechny suchozemské rostliny. Model dosahuje tohoto prahu přibližně za **1,87 miliardy let**.

Jde o převzaté biologické limity, nikoli univerzální teploty, při nichž nutně selže každý fotosyntetický organismus. Globální průměr navíc skrývá velké regionální rozdíly. Studie samostatně zkoumá, kde by mohly zůstat vhodné kombinace teploty a vody, ale popisek na klimatické mapě nemůže katalogi-

zovat každé budoucí útočiště či adaptaci.

## Mezní případ dvě: snesitelná teplota, příliš málo oxidu uhličitého

Ve větvi silného zvětrávání je globální průměrná teplota udržována na 288 kelvinech, přibližně 15 stupních Celsia, zatímco atmosférický oxid uhličitý klesá. Odpověď zde závisí na tom, jak malé množství uhlíku by mohly různé fotosyntetické dráhy využívat.

- Při tradičním prahu **10 částí na milion** — deseti molekulách oxidu uhličitého na každý milion molekul atmosféry — nastává limit pro fotosyntézu C4 přibližně za **1,35 miliardy let**. Fotosyntézu C4 používají mimo jiné kukuřice a cukrová třtina a soustřeďuje oxid uhličitý kolem enzymu, který jej fixuje.
- Použití alternativního prahu C4 **2,9 části na milion**, diskutovaného v dřívější práci, posouvá limit přibližně na **1,64 miliardy let**.
- Předběžný práh **1 část na milion**, spojovaný s možným přetrváním některých rostlin CAM — rostlin používajících metabolismus kyselin typu Crassulaceae, který odděluje příjem oxidu uhličitého v noci od jeho využití ve dne — nebo vodních rostlin schopných využívat rozpuštěný hydrogenuhličitan, posouvá limit přibližně na **1,84 miliardy let**.

Poslední číslo má největší biologickou výhradu. Autoři výslovně označují limit jedné části na milion za předběžný. Nejde o experimentálně stanovený práh přežití všech rostlin CAM nebo vodní vegetace v podmínkách budoucí Země.

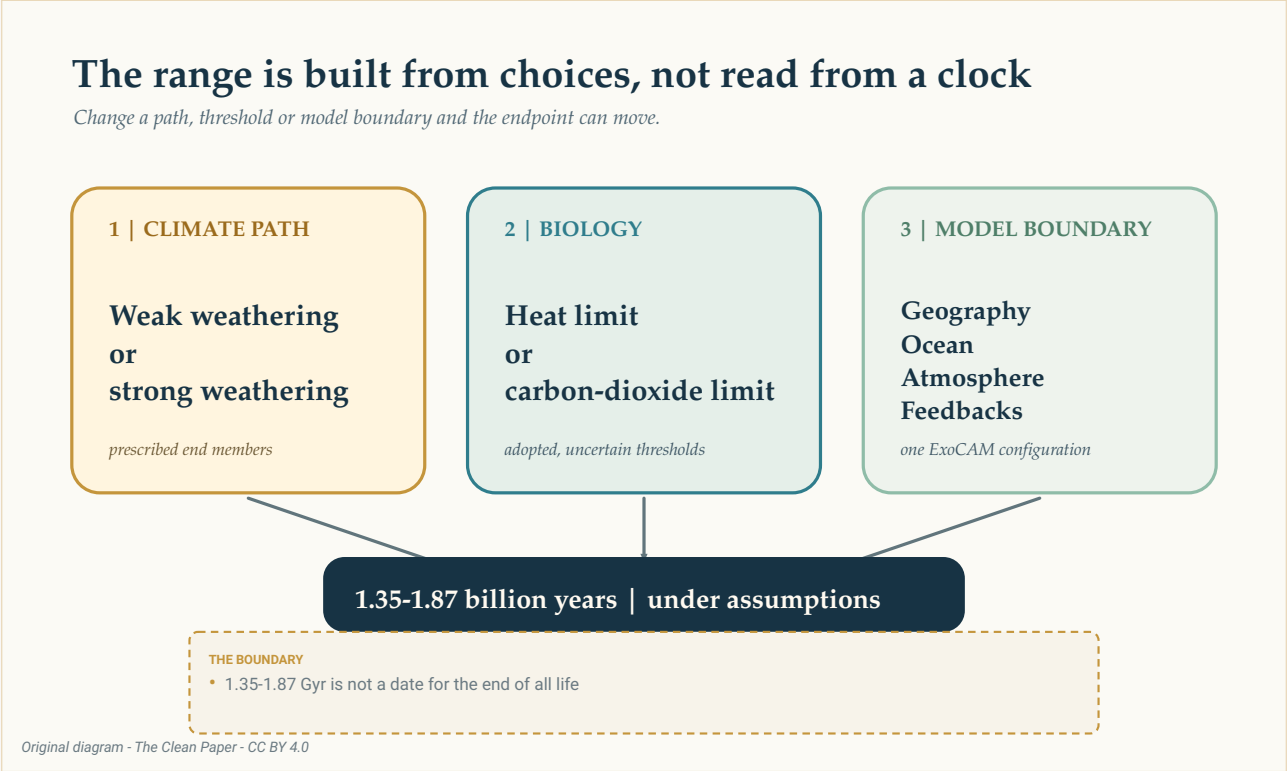
> **C3, C4 a CAM jsou strategie, ne žebříček**
>
> Rostliny používají k zachycování uhlíku různé biochemické dráhy. **Fotosyntéza C3** je nejběžnější. **Fotosyntéza C4**, používaná mimo jiné kukuřicí a cukrovou třtinou, soustřeďuje oxid uhličitý kolem enzymu fixujícího uhlík a může fungovat lépe při jeho nedostatku. **Metabolismus kyselin typu Crassulaceae (CAM)** odděluje příjem a využití uhlíku mezi noc a den a pomáhá mnoha rostlinám šetřit vodou.
> Jde o rodiny strategií s mnoha rozdíly mezi druhy, nikoli o po sobě jdoucí stupně „lepších“ rostlin. Velmi nízké prahy oxidu uhličitého v článku jsou předpoklady pro zkoumání možných limitů, nikoli záruka, že budoucí ekosystém vyvine schopnost je využít.

## Proč 1,86 miliardy let není datum spotřeby

Hlavní odhad článku kolem **1,86 miliardy let** je průměrem dvou optimistických horních koncových bodů: 1,84 miliardy let ve větvi omezené oxidem uhličitým a 1,87 miliardy let ve větvi omezené teplem. Je to stručné shrnutí dvou rozdílných scénářů. Není to třetí výsledek modelu s vyšší přesností ani

nejlepší odhad data.

Ani širší rozpětí 1,35 až 1,87 miliardy let nemá jednu pravděpodobnost. Dolní a horní hodnoty závisejí na odlišných předpokladech o zvětrávání, odlišných biologických prazích a jedné konfiguraci klimatického modelu. Rozpětí měří volby v experimentu stejně jako čas.




Rozpětí 1,35 až 1,87 miliardy let vzniká až po volbě dráhy zvětrávání, biologického prahu a hranice modelu. Je to mapa předpokladů, ne hodiny odpočítávající vyhynutí všeho života.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Jiné limity mohou přijít dříve

Nejdelší odhady vegetační biosféry se přibližují samostatné a nejisté hranici: vlhkému či překotnému skleníkovému efektu, který by mohl vést k rozsáhlé ztrátě oceánů. Klimatické modely se výrazně rozcházejí v tom, kdy tyto stavy při rostoucím slunečním záření začínají, zejména daleko od dnešních podmínek. Některé odhady je kladou před nejoptimističtější limit fotosyntézy.

Horní větev proto nelze číst jako příslib, že Země udrží oceány, známé kontinenty nebo obyvatelné povrchové podmínky až do doby 1,87 miliardy let od současnosti. Model nezahrnuje ani budoucí deskovou tektoniku, změny rozlohy souše, vyvíjející se ekosystémy či plně dynamický oceán. Jeho výpočty pohlcování a vyzařování energie atmosférou jsou navíc tlačeny do režimů intenzivního slunečního záření a mimořádně nízkého oxidu uhličitého, v nichž se různé modely rozcházejí.

Evoluční adaptace a technologický zásah se objevují v diskusi článku jako možnosti. Nejsou výsled-

kem 29 klimatických simulací. Model neukazuje, že budoucí organismy vyvinou fotosyntetickou dráhu fungující při jedné části na milion, ani že civilizace bude miliardu let řídit atmosféru.

## Nejde o výsledek o dnešní klimatické krizi

Zjasňování Slunce působí po stovky milionů až miliardy let. Současné oteplování vyvolané člověkem pochází z rychlého růstu skleníkových plynů během desetiletí a staletí. Jde o odlišná působení v radikálně odlišných časových měřítkách, která odpovídají na jiné otázky.

Nic v této studii neoslabuje důkazy o současné změně klimatu ani neobhajuje odklad opatření. Biosféra, která by v jednom vzdáleném modelovém scénáři mohla udržet část fotosyntetického života, není totéž jako klima, v němž zůstanou bezpečné dnešní společnosti a ekosystémy.

Článek je cenný, protože vzdálenou otázku činí disciplinovanější. Ukazuje, že dřívější jednodušší modely mohly při rostoucím slunečním záření a pevném oxidu uhličitém přehřívat příliš silně a že fotosyntetický život může mít více cest k přetrvání, než naznačuje jeden kanonický uhlíkový práh. Zároveň ukazuje, proč je každá další desetina miliardy let spojena s řetězcem předpokladů.

Slunce, které živí list, se pomalu mění. Zda Země zůstane zelená dalších 1,35, 1,87 nebo jiný počet miliard let, bude záviset na společné reakci hornin, vody, atmosféry a života. Poctivým výsledkem není datum. Je jím širší pohled na tuto dohodu.

## Stručné shrnutí

Trojrozměrná klimatická studie se ptá, jak dlouho může vegetační — fotosyntetická — biosféra Země přetrvat při pomalém zjasňování Slunce. Výzkumníci vypočítali 29 samostatných ustálených klimat a vedli přes ně dva ilustrativní mezní případy. Při slabém zvětrávání a oxidu uhličitém pevném na 400 částech na milion nastávají převzaté tepelné limity suchozemských rostlin přibližně za 1,68 a 1,87 miliardy let. Při silném zvětrávání a globální průměrné teplotě pevné na 288 kelvinech, asi 15 stupních Celsia, nastávají převzaté limity oxidu uhličitého pro fotosyntézu přibližně za 1,35, 1,64 a — při použití předběžného prahu — 1,84 miliardy let. Často citovaných 1,86 miliardy let je pouze zaokrouhlený průměr dvou optimistických horních koncových bodů. Jde o modelová rozpětí závislá na scénáři, nikoli datum konce Země, lidstva nebo všeho života. Model používá předepsané dráhy, dnešní geografii, deskový oceán a neobsahuje explicitní vazbu půda–vegetace ani klima–zvětrávání; nejdelší odhady se navíc blíží nejistým limitům skleníkového efektu a ztráty oceánů.

## Kontrola bez příkras

**Co článek ukazuje:** V této konfiguraci ExoCAM se trojrozměrná klimata při rostoucím slunečním záření a pevném oxidu uhličitém obecně oteplují méně než zjednodušené modely použité ke

srovnání. Ve dvou předepsaných mezních případech zvětrávání a při několika převzatých biologických prazích leží limity vegetační biosféry přibližně mezi 1,35 a 1,87 miliardy let od současnosti.

**Co je věrohodné, ale neprokázané:** Že některé rostliny CAM nebo vodní rostliny využívající rozpuštěný hydrogenuhličitan mohou udržet fotosyntézu při atmosférickém oxidu uhličitém kolem jedné části na milion; že adaptace či technologie mohou fotosyntetický život prodloužit; a že skutečná dráha klimatu a zvětrávání zůstane mezi dvěma modelovými mezními případy.

**Co článek neukazuje:** Pevné datum konce všech rostlin, všeho života, lidské civilizace, oceánů Země nebo planety; jednu nepřetržitou simulaci příštích dvou miliard let; ani jakýkoli důvod zlehčovat současnou změnu klimatu způsobenou člověkem.

**Hlavní omezení:** Dvacet devět ustálených případů z jedné rodiny klimatického modelu; předepsané, nikoli dynamicky propojené dráhy zvětrávání; dnešní geografie; deskový oceán; pevný metan; nulová obliquita a excentricita; žádné explicitní půdy, vegetace ani zpětná vazba biosféry; nejisté tepelné a uhlíkové prahy; a velké rozdíly mezi modely poblíž vlhkého a překotného skleníkového efektu.

**Jak velkou důvěru by měl mít běžný čtenář?** Vysokou důvěru, že studie rozšiřuje věrohodné modelové rozpětí a pojmenovává předpoklady, které je řídí. Střední důvěru v číselné rozpětí jako užitečné ohraničení v rámci tohoto modelu. Nízkou důvěru v jakékoli přesné datum, protože nejvzdálenější koncové body závisejí na záměrně krajních klimatických drahách a nejisté biologii.

## Zdroje

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