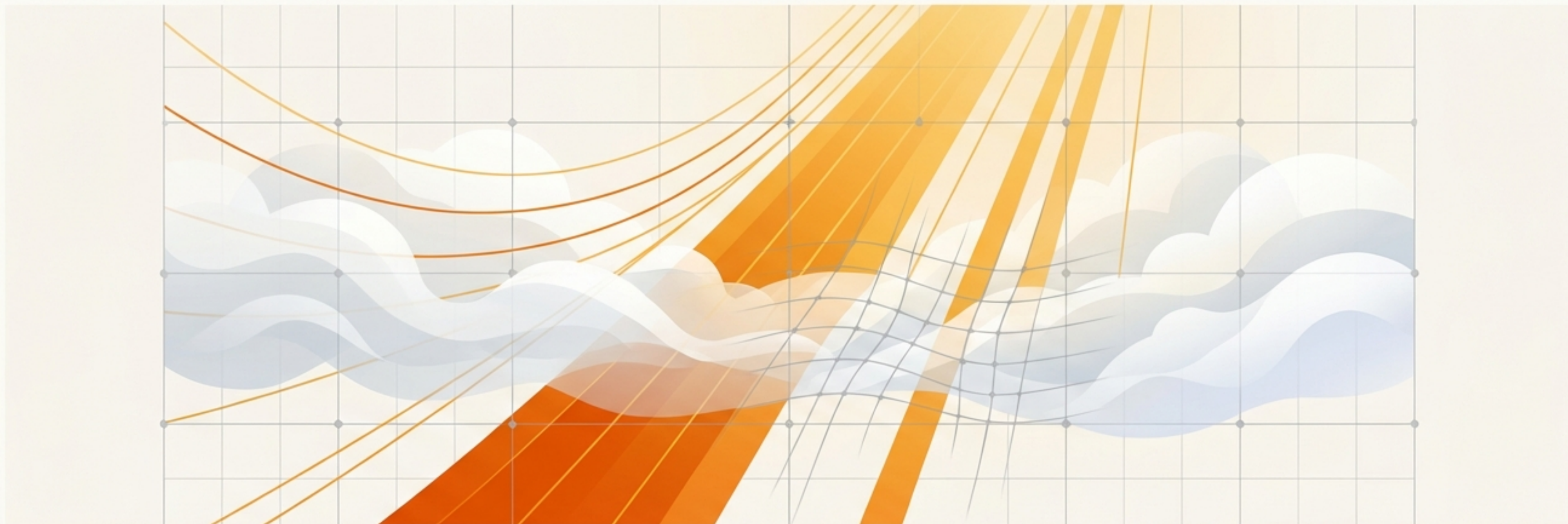




Svetlejši svet: Skrivnost sončne svetlobe, podnebni modeli in kaj spregledajo

Analiza neskladij med opazovanimi in modeliranimi trendi kratkovalovnega sevanja na kopnem.

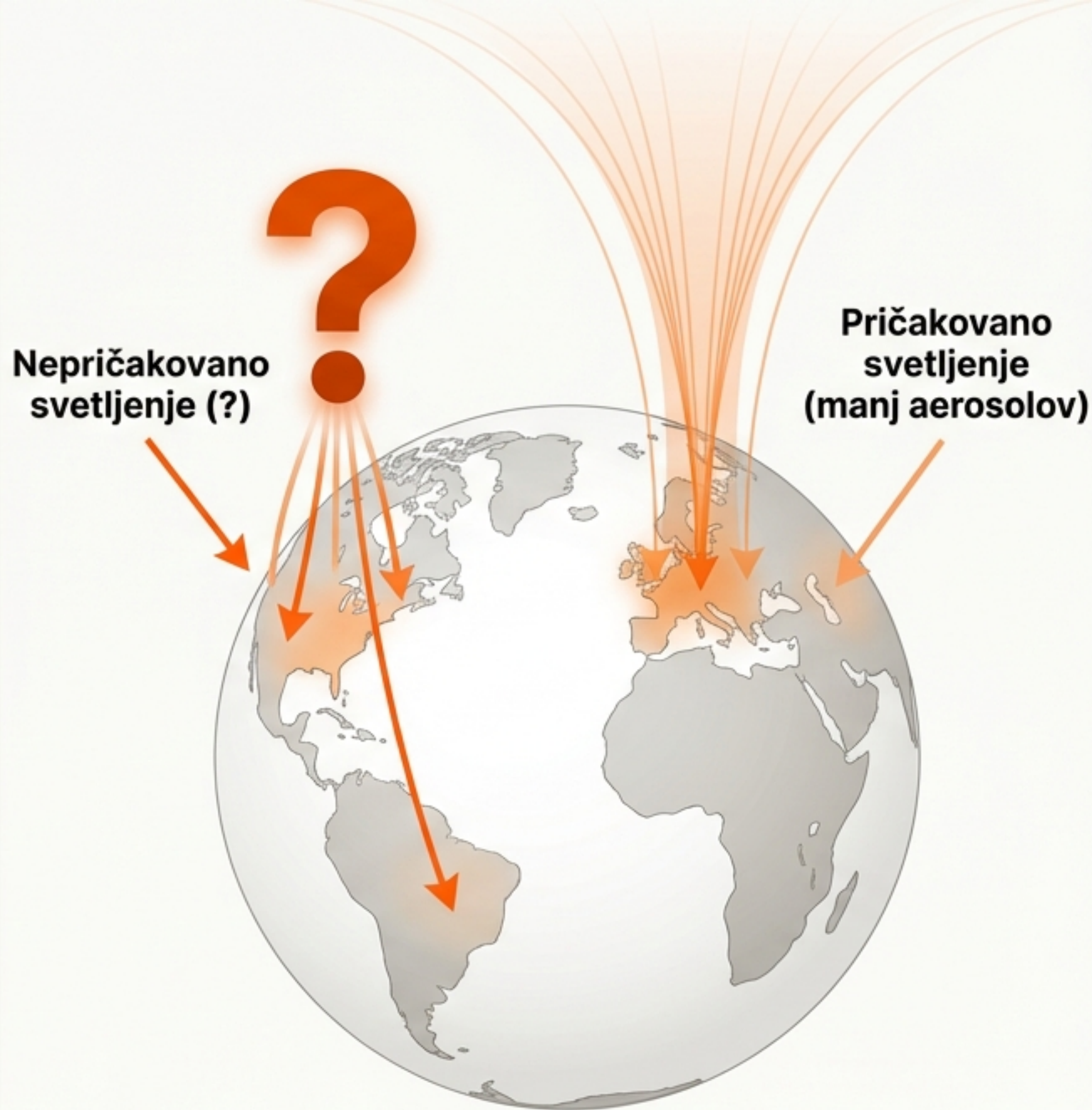
Povzeto po raziskavi K. A. McKinnon & I. R. Simpson, *Geophysical Research Letters*, 52, e2025GL119493 (2025).

Naslov: "Zemeljsko površje postaja svetlejšje. Vendar ne povsod iz pričakovanih razlogov."

Opazovanja kažejo, da je v zadnjih desetletjih (1980–2024) veliko kopenskih območij prejelo več sončne svetlobe. Ta pojav, znan kot "svetljenje", je bil pričakovan v regijah, kot sta Evropa in vzhod ZDA, kjer se je zmanjšalo onesnaženje zraka (aerosoli).

Vendar pa smo opazili znatno svetljenje tudi v osrednjem delu ZDA, Braziliji in Srednji Aziji, kjer se koncentracije aerosolov niso bistveno spremenile.

Ključno vprašanje: "Kateri dejavniki so odgovorni za to nepričakovano svetljenje in kaj nam to pove o našem podnebjju?"



Za globalno sliko potrebujemo zanesljiv in celovit vir podatkov.

Problem

Razumevanje globalnih trendov sončnega sevanja je težavno zaradi dveh glavnih ovir:



1. Omejeni opazovalni podatki: Merilne postaje so redke in geografsko koncentrirane (ZDA, Zahodna Evropa, Kitajska, Japonska), njihovi zapisi pa so pogosto prekratki za zanesljivo določanje trendov.



Rešitev

Sistematično preveriti in validirati najsodobnejše globalne podatkovne sete z uporabo najkakovnejših, a prostorsko omejenih meritev, da bi ustvarili zanesljiv "zemljevid" sprememb.



2. Nezanesljivost obstoječih globalnih produktov: Satelitski produkti in reanalize imajo svoje omejitve in doslej ni bilo izvedene celovite validacije njihove zmožnosti zajemanja dolgoročnih trendov površinskega sevanja.

Podatkovni set ERA5 se izkaže za zanesljivo orodje za našo preiskavo.

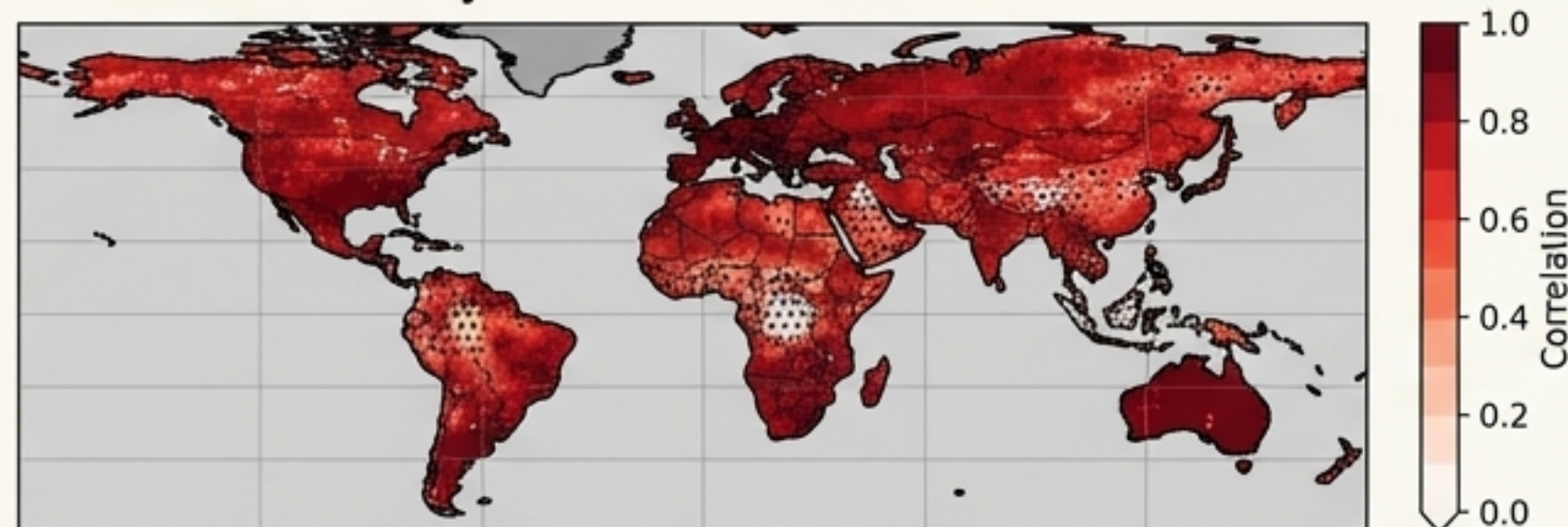
Validacija:

Ugotovili smo, da se reanaliza ERA5 dosledno ujema z visokokakovostnimi, neodvisnimi meritvami.

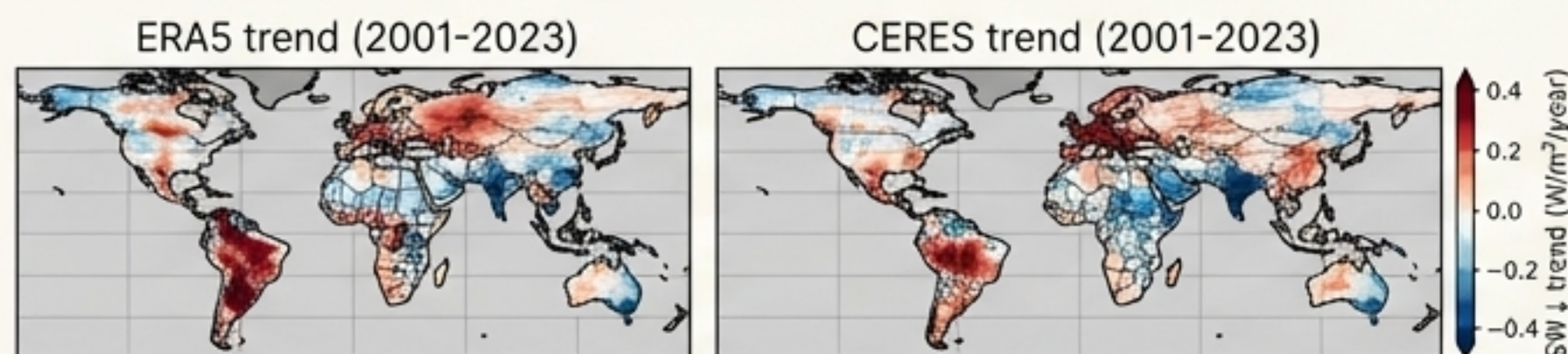
- Primerjava s satelitom CERES (2001–2023): ERA5 kaže visoko korelacijo medletne variabilnosti in podobne prostorske vzorce trendov.
- Primerjava s postajami GEBA (20+ let podatkov): ERA5 dobro zajame variabilnost in glavne značilnosti trendov, ki jih merijo postaje na tleh. Mediana medletne korelacije je 0.69.

Zaključek: ERA5 je najboljši razpoložljiv produkt za analizo dolgoročnih (1980–2024) globalnih trendov sončnega sevanja na kopnem.

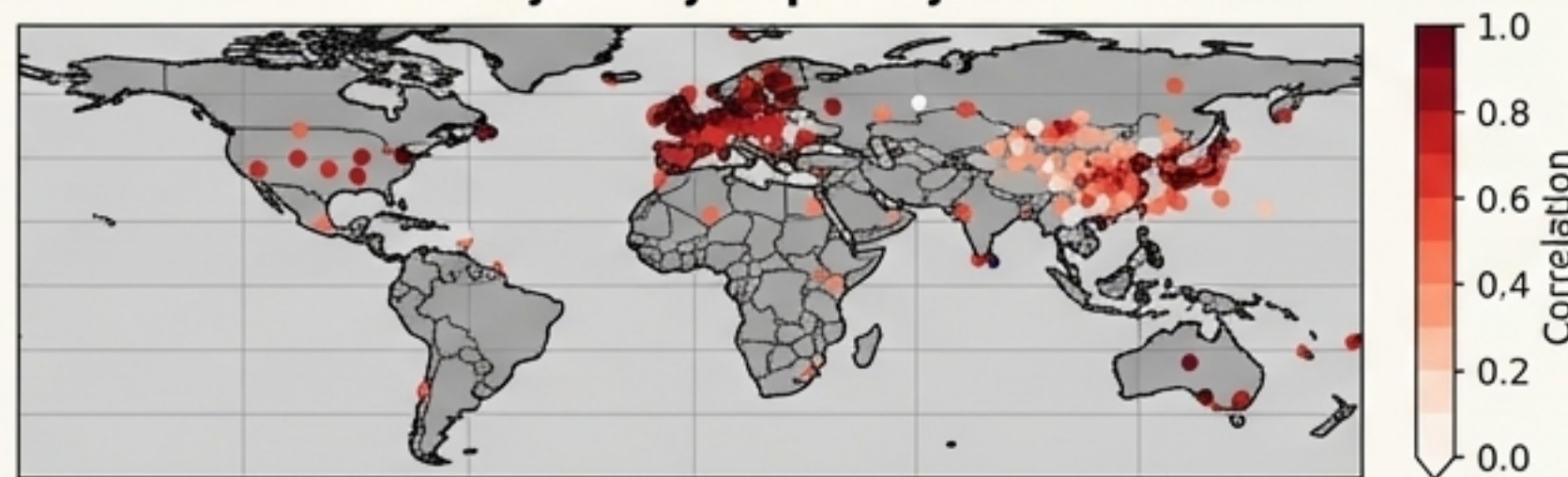
Visoka korelacija medletne variabilnosti s satelitom



Podobni vzorci trendov



Dobro ujemanje s postajami na tleh



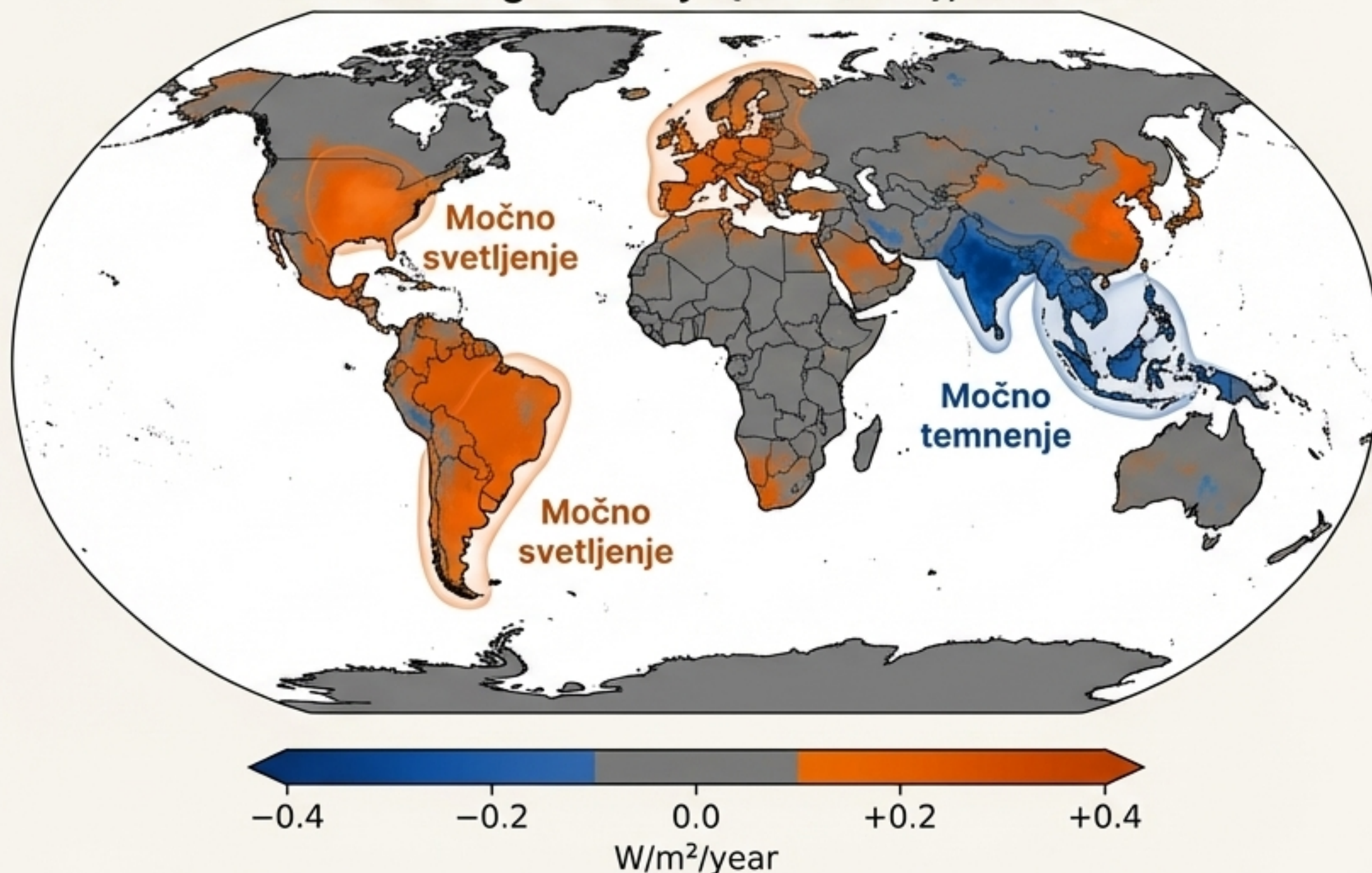
Opazovanja razkrivajo obsežno in neenakomerno 'svetljenje' kopnega v zadnjih štirih desetletjih.

Ključne ugotovitve (1980–2024)

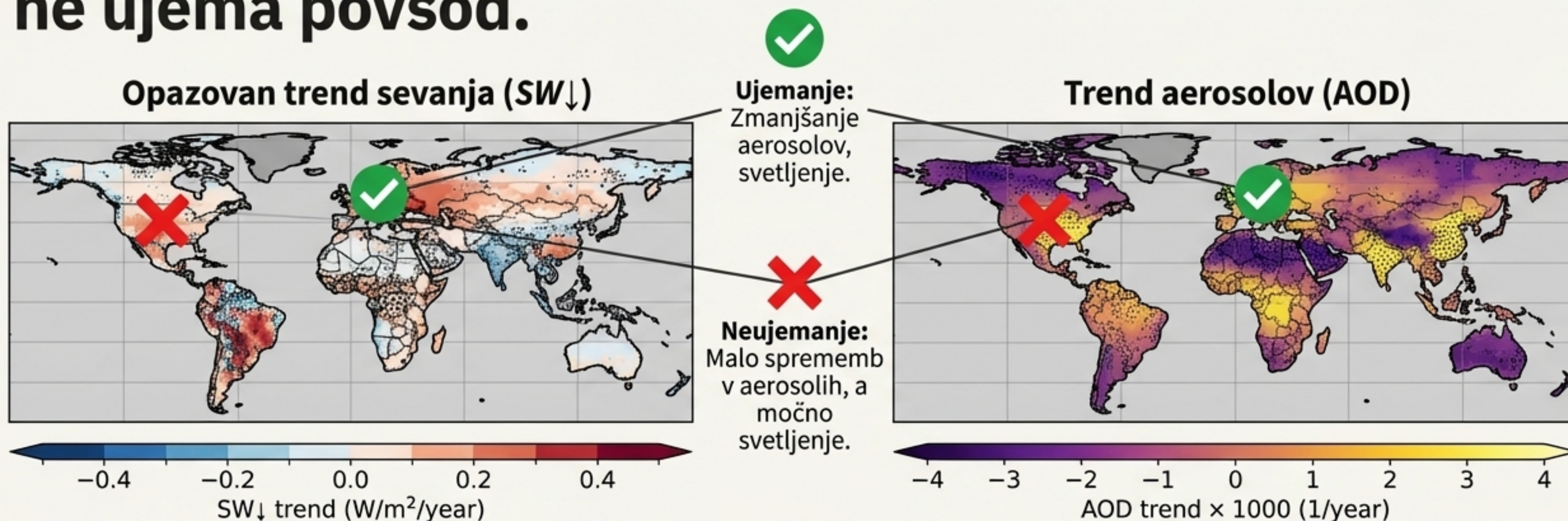
- * **Močno svetljenje:** Osrednji del ZDA, večji del Južne Amerike (predvsem Brazilija in Argentina), Evropa in jugovzhodna Kitajska.
- * **Močno temnenje:** Indija in Pomorska celina.
- * **Manjši trendi:** Avstralija, večji del Afrike, Kanada in Rusija.

Ta zemljevid predstavlja našo najboljšo oceno dejanskih sprememb in je izhodišče za iskanje vzrokov.

Trend Sončnega Sevanja ($SW\downarrow sfc$), 1980–2024



Glavni osumljenec so aerosoli, vendar se zgodba ne ujema povsod.

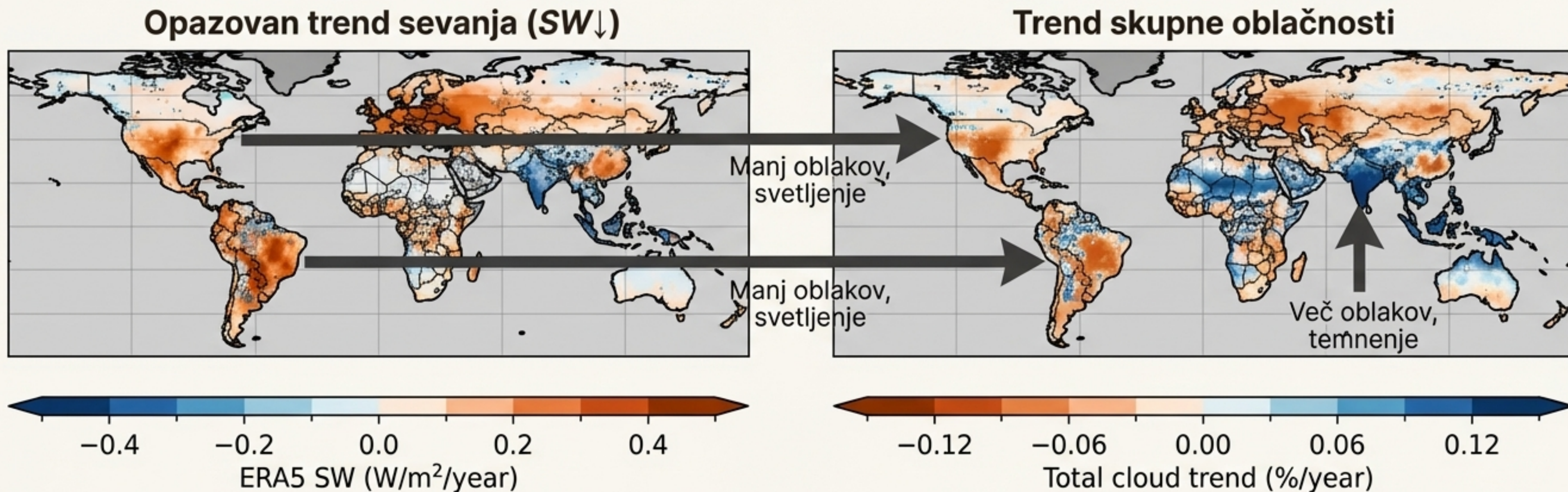


Hipoteza: Zmanjšanje onesnaženosti zraka (aerosolov) vodi do večje prepustnosti atmosfere za sončno svetlobo, kar povzroča svetljenje.

- **Kje se ujema:** Trendi se ujemajo v Evropi (zmanjšanje aerosolov, svetljenje) in v Indiji (povečanje aerosolov, temnenje). Korelacija med trendom aerosolov in trendom sevanja v jasnem nebu je -0.74.
- **Kje se ne ujema:** Močno svetljenje v osrednjem delu ZDA, Južni Ameriki in jugovzhodni Kitajski ni pojasnjeno s trendi aerosolov, ki so v teh regijah majhni.

Zaključek: Aerosoli so pomembni, a ne edini dejavnik. Drugi mehanizem mora biti vpleten.

Nepričakovan dejavnik: Spremembe v skupni oblačnosti se presenetljivo dobro ujemajo z vzorci svetljenja.



Opazovanje: Večina prostorske strukture v trendih sončnega sevanja je tesneje povezana s trendi v skupni pokritosti z oblaki kot s trendi aerosolov.

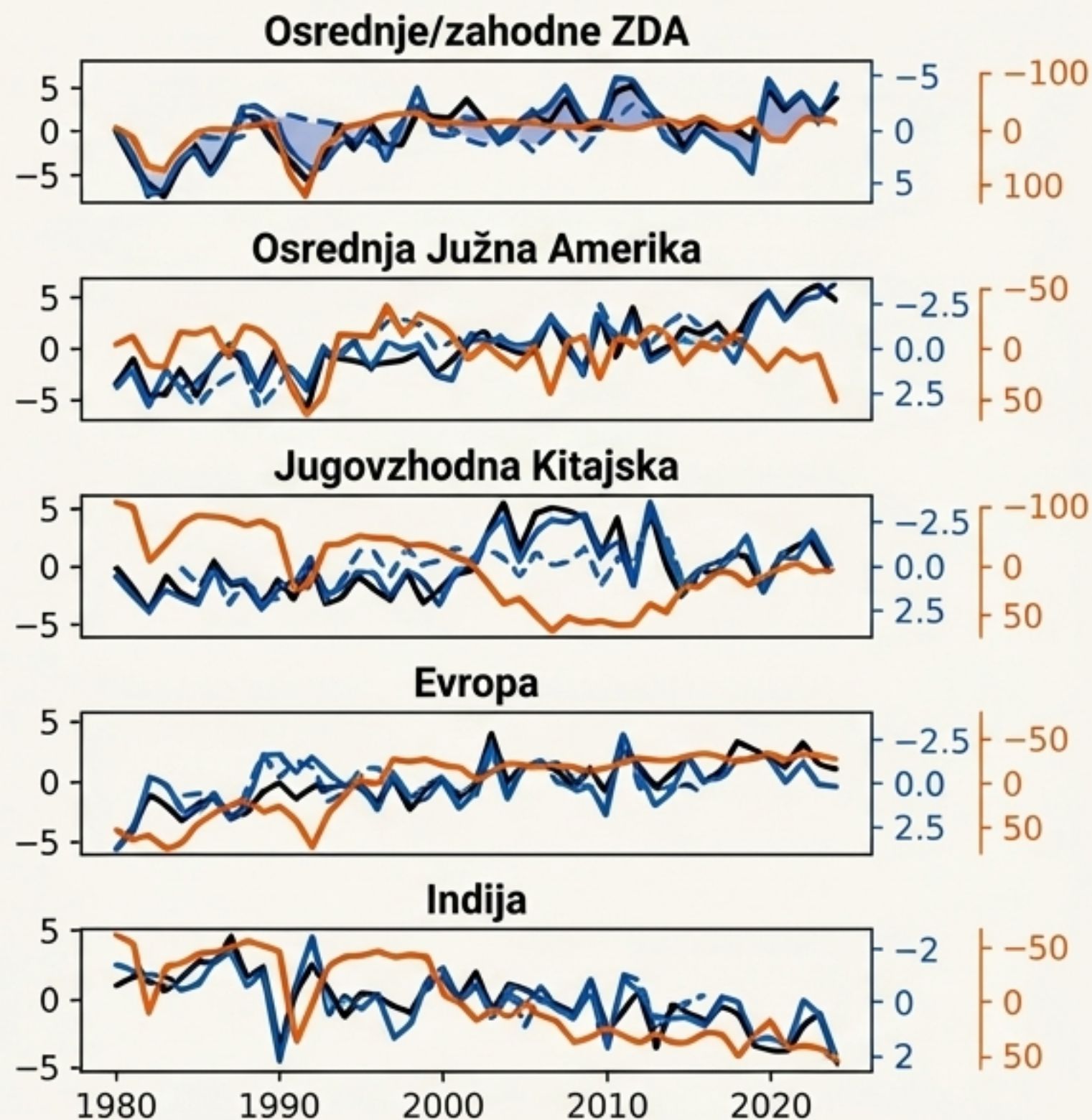
- V regijah, kot so osrednje ZDA, Južna Amerika in jugovzhodna Kitajska, se zmanjšanje oblačnosti ujema z opazovanim svetljenjem.
- Tudi tam, kjer so vplivi aerosolov očitni (Evropa, Indija), trendi oblačnosti sledijo v isti smeri in verjetno prispevajo k skupnemu učinku.

Ugotovitev: Spremembe v oblačnosti so ključni dejavnik, ki pojasnjuje velik del opazovanih trendov sončnega sevanja po svetu.

Regionalne študije primerov potrjujejo prevladujočo vlogo oblakov.

Analiza časovnih vrst: Primerjava letnih povprečij sončnega sevanja ($SW\downarrow$), oblačnosti in aerosolov (AOD) za pet ključnih regij. Osi za oblačnost in aerosole so obrnjene za lažjo primerjavo.

- **Osrednje/zahodne ZDA, osrednja Južna Amerika, jugovzhodna Kitajska:** Trend sončnega sevanja (črna črta) jasno sledi trendu zmanjševanja oblačnosti (modra črta). Povezava s trendom aerosolov (oranžna črta) je minimalna.
- **Evropa in Indija:** Vsi trije trendi so usklajeni, kar kaže na verjetno kombinacijo vplivov aerosolov in oblakov.



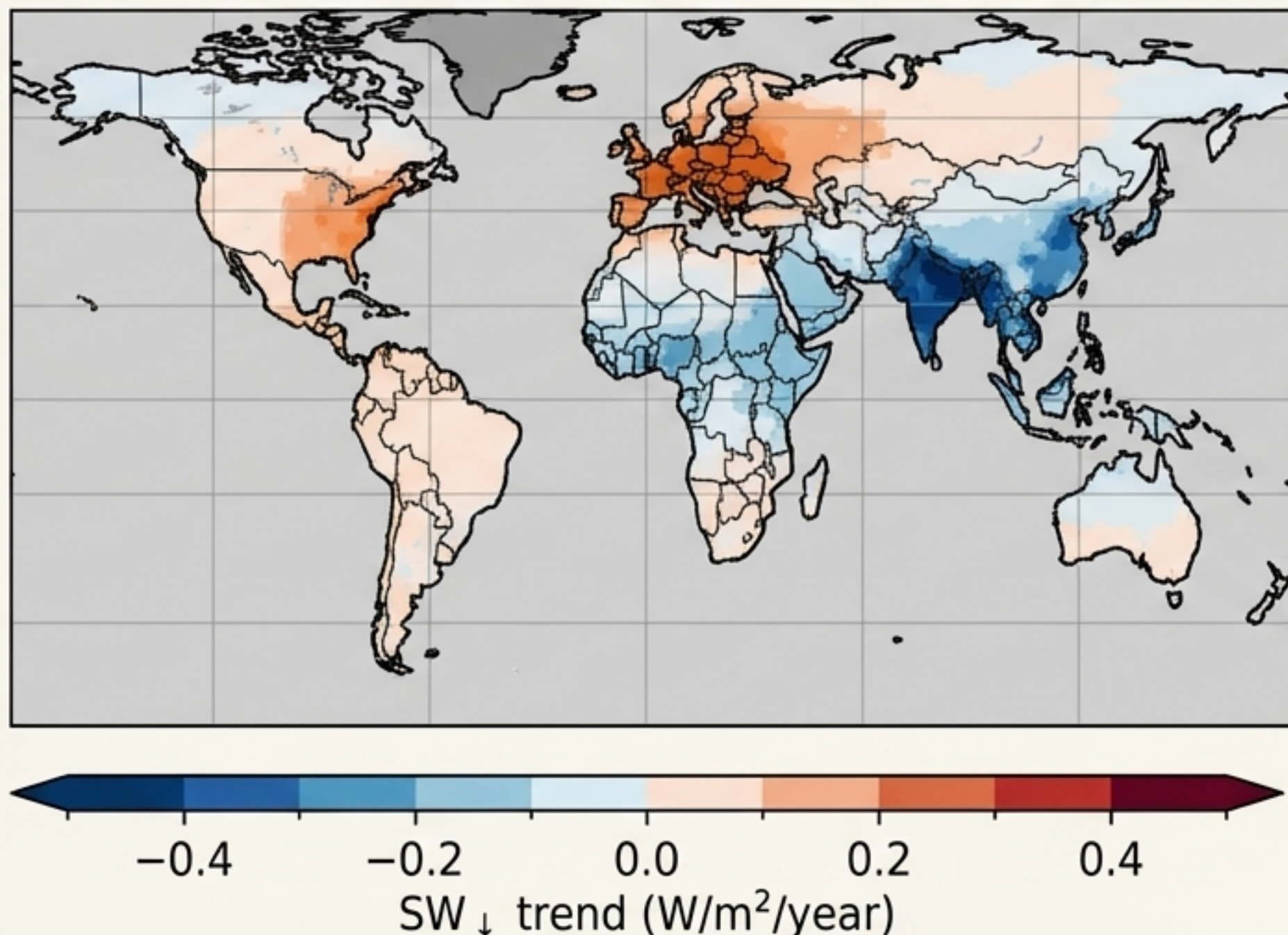
Kaj pa "uradna zgodba"? Podnebni modeli napovedujejo svet, ki ga poganjajo predvsem aerosoli.

Konsenz modelov (CMIP6): Srednja vrednost ansambla 237 simulacij podnebnih modelov kaže zelo drugačno sliko trendov sončnega sevanja.

- Glavne značilnosti so skoraj v celoti posledica sprememb v aerosolih: svetljenje nad vzhodom ZDA in Evropo, temnenje nad jugovzhodno Azijo.
- Prostorski vzorci so presenetljivo dosledni med različnimi modeli, kar kaže, da je signal vsiljenega delovanja aerosolov močnejši od notranje variabilnosti modelov.

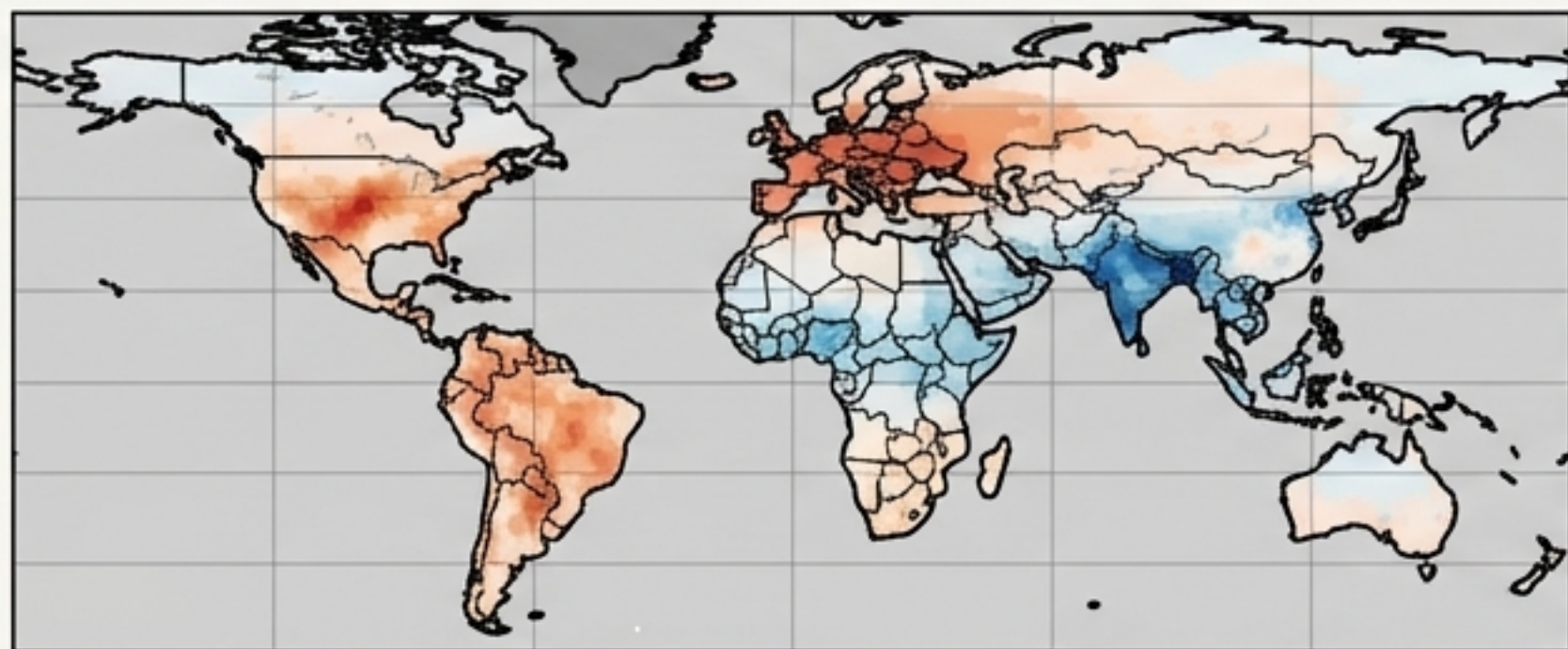
Ta zemljevid predstavlja pričakovano sliko sprememb po mnenju trenutne generacije podnebnih modelov.

Napoved modelov (CMIP6 povprečje)



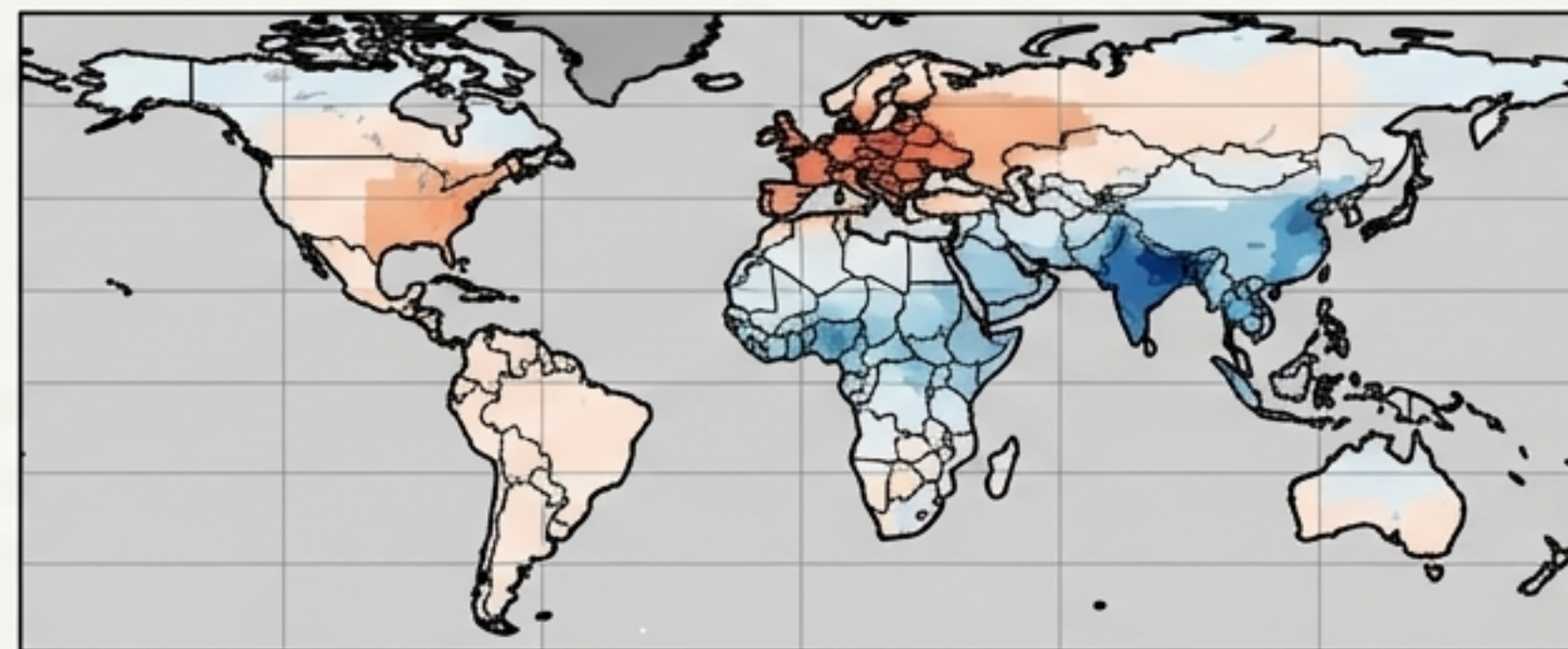
Razkritje: Opazovana resničnost se bistveno razlikuje od simulacij podnebnih modelov.

REALNOST (ERA5)



vs

MODELI (CMIP6)



-0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4

SW ↓ trend (W/m²/year)

- Svetljenje je osredotočeno v osrednjem in zahodnem delu ZDA ter po večjem delu Južne Amerike.
- Povezano je predvsem s spremembami oblačnosti.

-0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4

SW ↓ trend (W/m²/year)

- Svetljenje je osredotočeno na vzhodu ZDA in v Evropi.
- Povezano je predvsem s spremembami aerosolov.

Ključna ugotovitev: Modeli ne reproducirajo opazovanega svetljenja v več ključnih kontinentalnih regijah

Opazovano svetljenje je tako ekstremno, da presega skoraj vse simulacije podnebnih modelov.

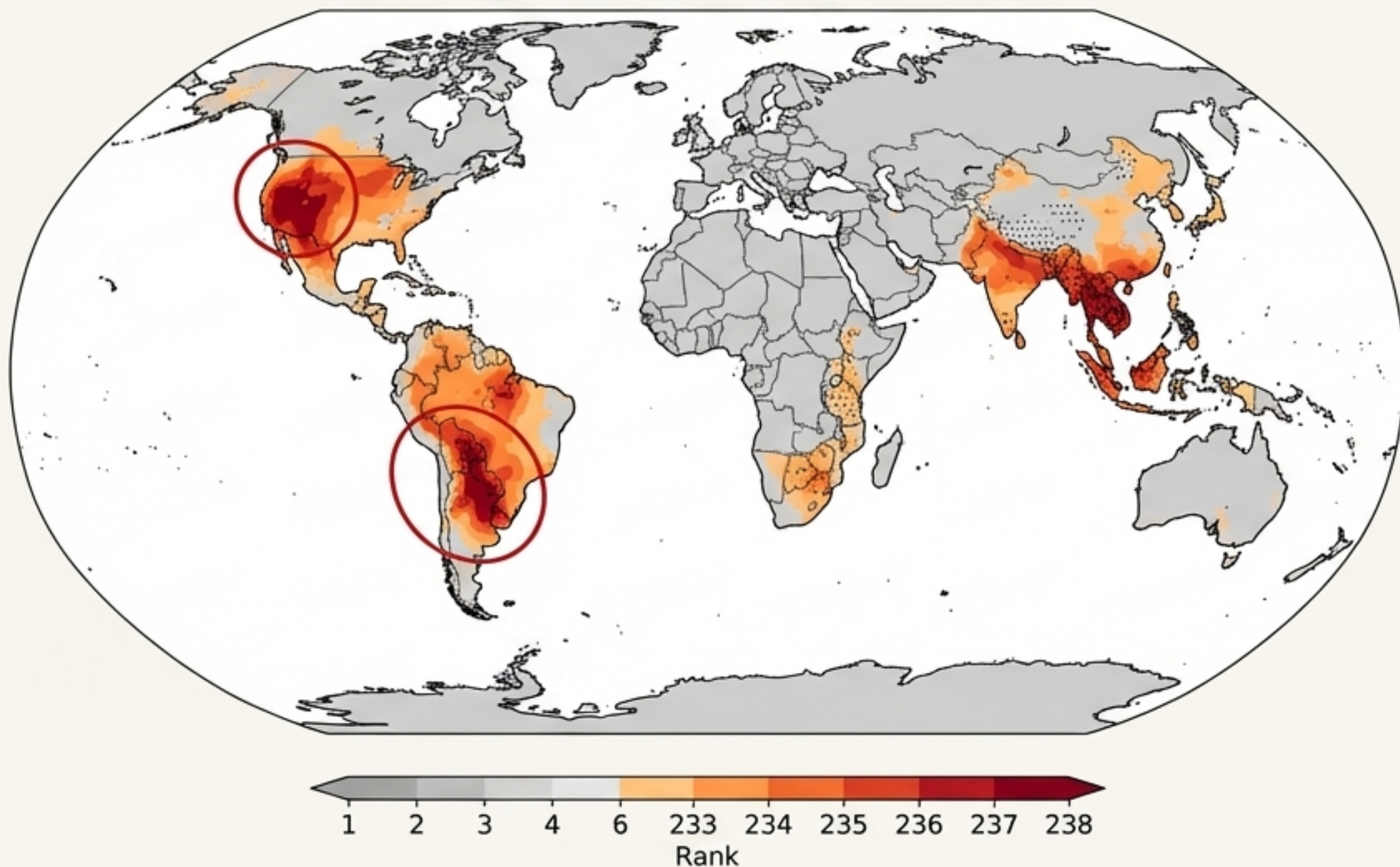
Kako izjemen je opazovani trend?

Primerjali smo trend iz ERA5 z ansamblom 237 simulacij modelov (CMIP6 + CESM2-LE) in določili njegov "rang". Rang 238 pomeni, da je opazovani trend močnejši od vseh 237 simulacij.

Rezultati:

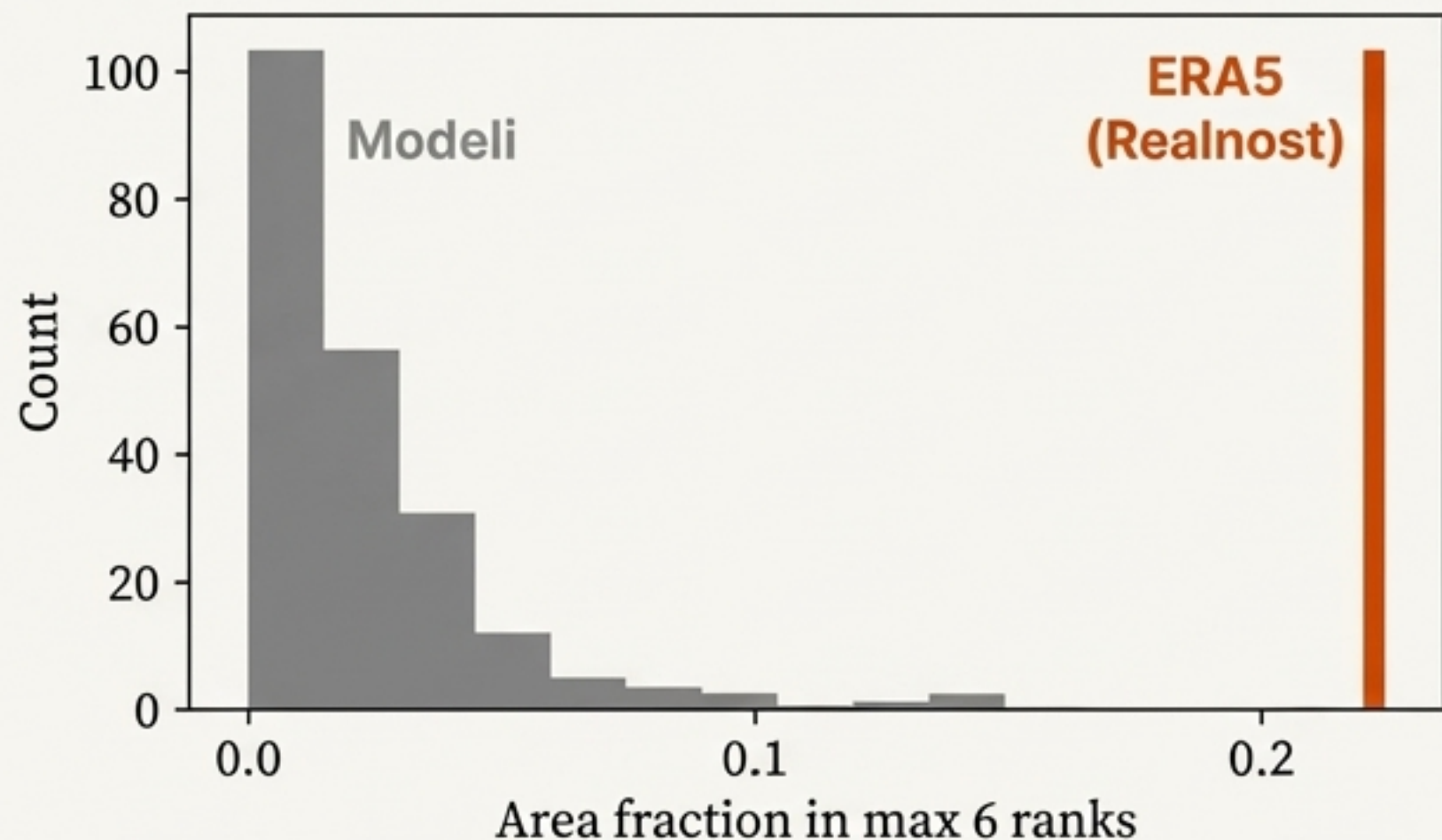
- * V velikih delih zahodnih in osrednjih ZDA, večjem delu Južne Amerike in delih Azije je opazovani trend na skrajnem zgornjem robu ali popolnoma zunaj območja, ki ga simulirajo modeli.
- * Rdeča območja na zemljevidu kažejo, kje je realnost bolj ekstremna od *katere koli* simulacije modelov.

Rang opazovanega trenda (ERA5) znotraj 237 simulacij

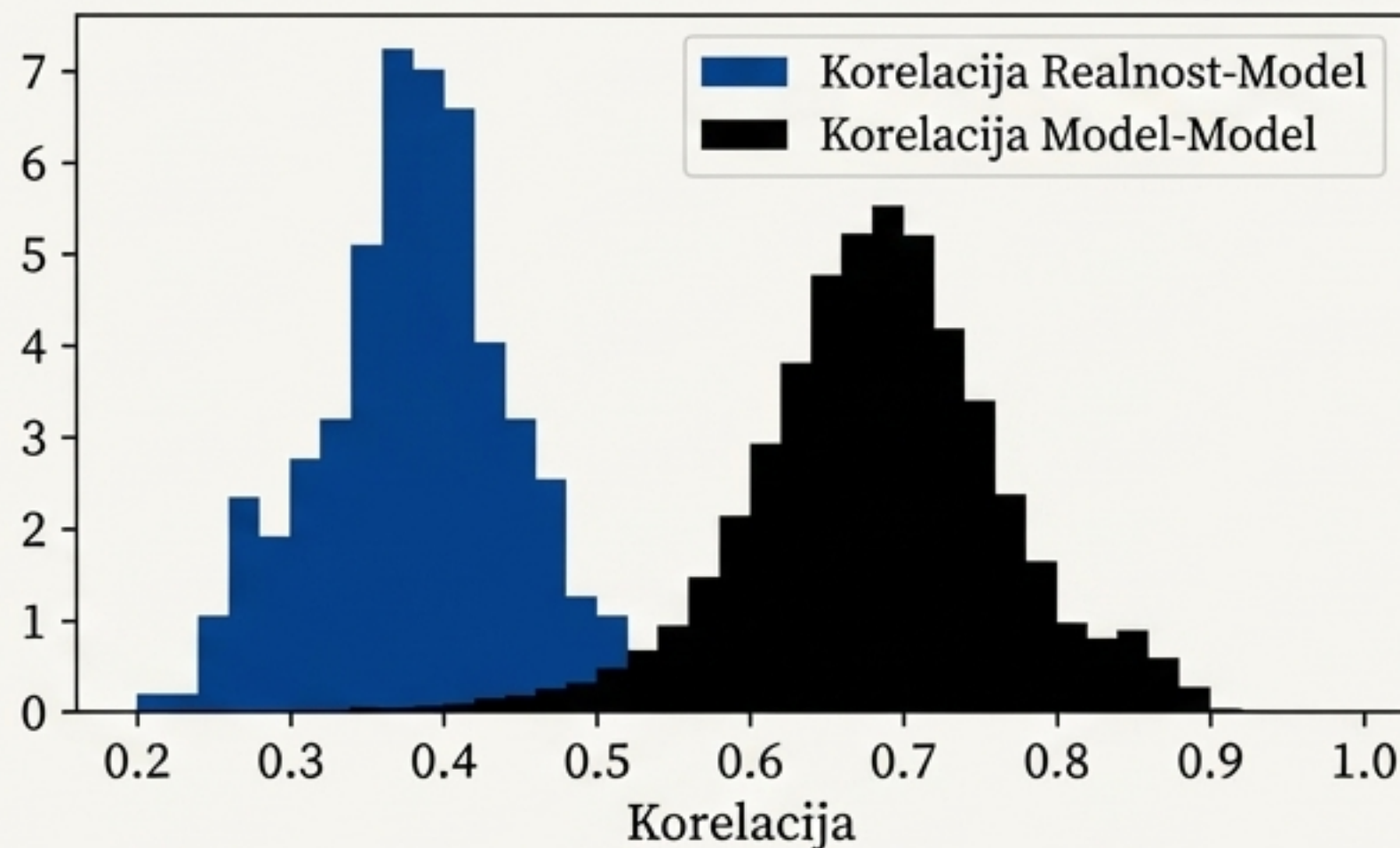


Neskladje je očitno tako v magnitudi kot v prostorskem vzorcu.

1. Magnituda trendov je zunaj območja modelov.



2. Prostorski vzorci se ne ujemajo.



“ V več kot 20 % analiziranih kopenskih območij je opazovano svetljenje močnejše kot v *katerikoli* od 237 simulacij modelov.

“ Povprečna korelacija med katerima koli parom modelov je 0.68. Povprečna korelacija med realnostjo in modelom je le 0.38.

Kaj pomeni to neskladje? Modeli morda precenjujejo vpliv aerosolov in podcenjujejo dinamiko oblakov.

Možne razlage in posledice



1. Napačen odziv na prisilna delovanja

Podnebni modeli so morda preveč občutljivi na spremembe aerosolov in ne zajamejo pravilno odziva oblakov na druge dejavnike (npr. toplogredne pline ali naravno variabilnost).



2. Podcenjena naravna variabilnost

Modeli morda podcenjujejo obseg nizkofrekvenčne naravne variabilnosti v oblačnosti nad kontinenti.

Zakaj je to pomembno?

Če modeli napačno simulirajo osnovne procese, ki uravnavajo sončno sevanje, to vpliva na zanesljivost prihodnjih projekcij regionalnega segrevanja, padavin in ekstremnih dogodkov. Projekcije so morda preveč odvisne od predpostavko prihodnjih emisijah aerosolov.

Sledi vodijo do globlje povezave: Neskladja se ujemajo z napakami modelov pri napovedovanju vlažnosti.

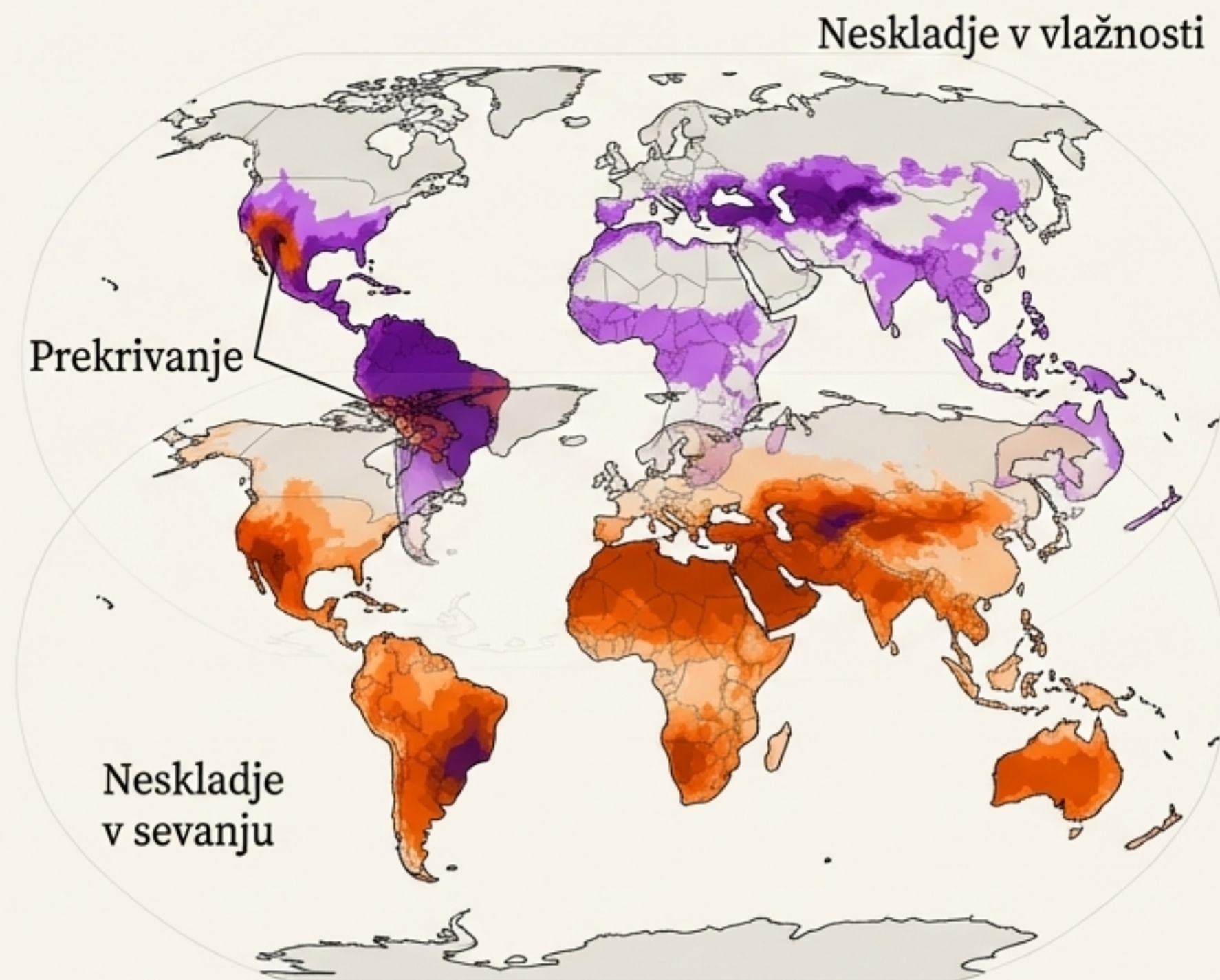
Povezava z drugo znanstveno uganko:

Regije, kjer smo ugotovili največje neskladje v trendih sončnega sevanja, se v veliki meri prekrivajo z regijami, za katere je bilo že prej ugotovljeno, da modeli napačno napovedujejo trende specifične vlažnosti (Simpson et al., PNAS, 2024).

- * Regije prekrivanja: Jugozahod ZDA, vzhod Južne Amerike, deli Srednje Azije.

Možna fizikalna povezava:

Manj razpoložljive vodne pare (kar modeli ne zajamejo pravilno) lahko vodi do zmanjšane tvorbe oblakov, kar posledično povzroči več sončnega sevanja na površju. Opaženi trendi v oblačnosti so prav tako zunaj območja simulacij modelov v istih regijah. To kaže na morebitno skupno napako v simulaciji kontinentalnega hidrološkega cikla.



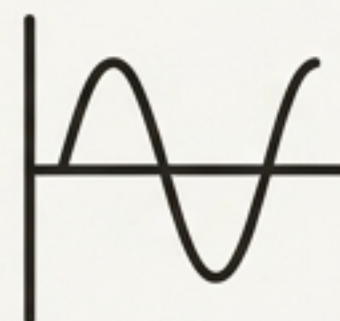
Razrešitev te skrivnosti je ključna za zanesljivejše podnebne napovedi.

Odprta vprašanja



Ali je neskladje med opazovanji in modeli posledica napačnega razumevanja **vsiljenih trendov** (odziv na aerosole in toplogredne pline)?

Odprta vprašanja



Ali pa je posledica sistematičnega podcenjevanja obsega **naravne variabilnosti** v podnebnem sistemu?

Pot naprej

Razumevanje in odprava teh neskladij, ki so verjetno povezana z napakami v simulaciji vlažnosti in oblakov nad kontinenti, sta bistvenega pomena. Le tako bomo lahko izboljšali zaupanje v simulacije kontinentalnega podnebja in s tem v naše napovedi prihodnjih sprememb, ki vplivajo na kmetijstvo, vodne vire in proizvodnjo sončne energije.