



Ogljična aritmetika Arktike

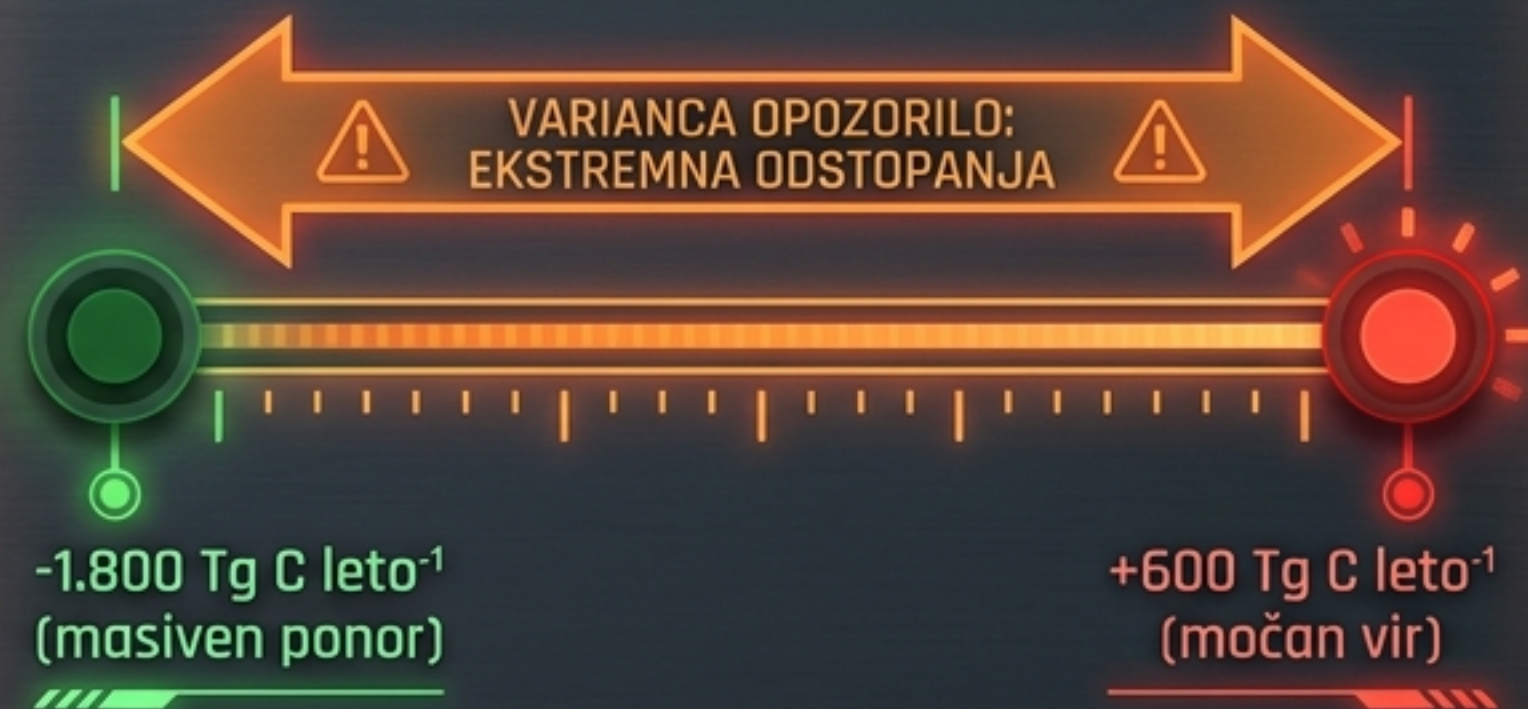
Kako gozdni požari brišejo sistemske ponore ogljika.
Geoprostorska analiza ABZ cone z modeli strojnega učenja.

Problem merila

50%

Severna tla permafrosta zadržujejo skoraj polovico vseh zalog organskega ogljika v tleh na svetu. Njegovo sproščanje bi drastično spremenilo globalno podnebno povratno zanko.

⚠ Odpoved prejšnjih modelov ⚠



Za inženirsko reševanje podnebnih sprememb potrebujemo natančnejšo diagnostiko systemskega ogljičnega cikla.

Vhodni podatki

In-situ senzorika:
Baza ABCflux (200 postaj,
4.897 meritev/mesec)

Satelitska telemetrija:
MODIS in AVHRR (NDVI)

Meteorologija:
ERA5 Land
(temperatura, tlak)

Procesiranje

Naključni gozdovi (Random Forests)

Prostorsko učenje integrira
17 okoljskih spremenljivk.
Optimizirano z 'leave-one-
site-out' validacijo.

Izhod



Zvezna 1-km prostorska
mreža ekosistemskih tokov
CO₂ po celotnem
Arktično-borealnem pasu
(2001-2020).

Zanesljivost napovedi (R^2)

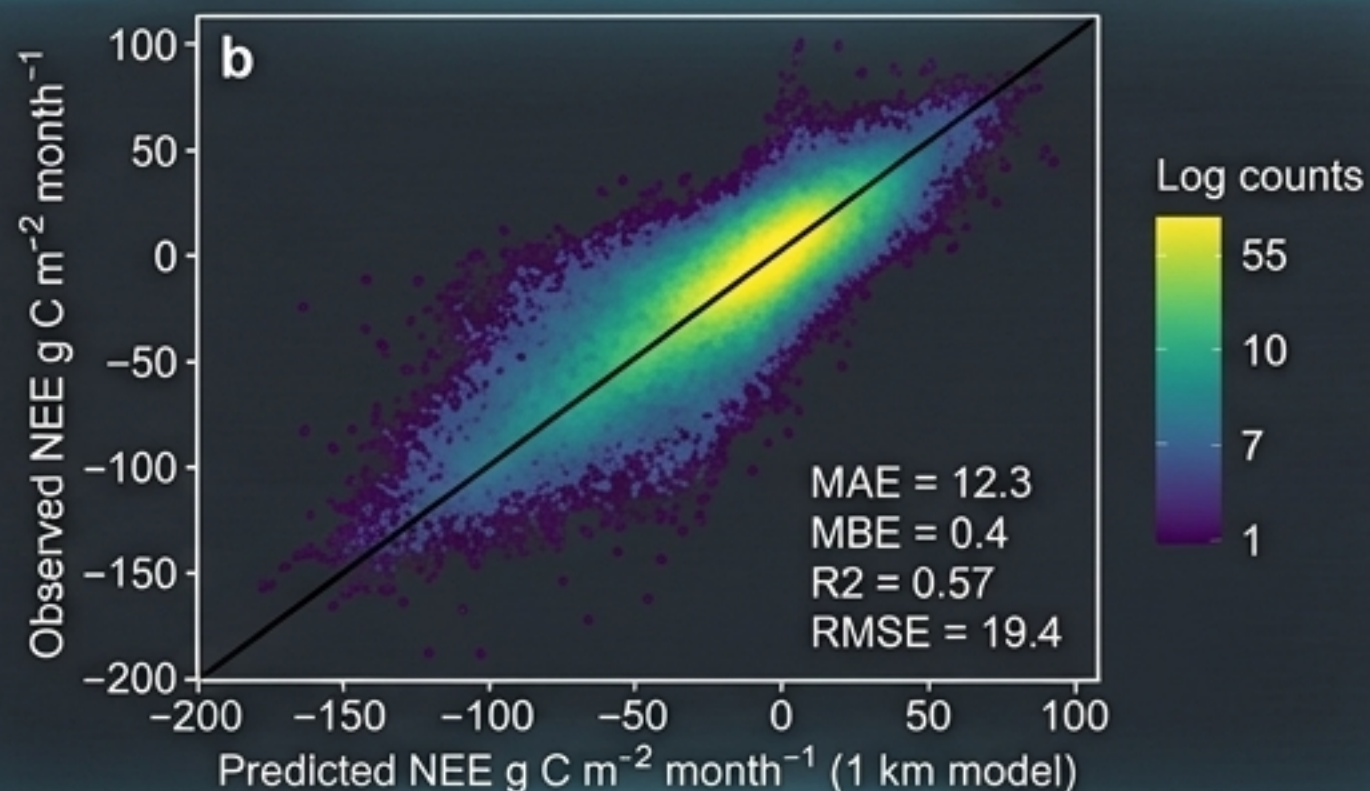
0.57 - 0.73

Do dvakrat višje kot pri prejšnjih metodah

Koren srednje kvadratne napake (RMSE)

19.4 - 37.3

$\text{g C m}^{-2} \text{ mesec}^{-1}$



⚠ Identificirane slepe pege (Blind Spots)

- Model podcenjuje ekstremne ponore CO_2 .
- Precenjuje ponore pri nedavnih požarih in hitro spreminjajočih se motnjah.
- Ekstrapolacija v osrednji Sibiriji nosi najvišjo stopnjo negotovosti zaradi pomanjkanja senzorjev.

$$\text{GPP} - \text{Reco} = \text{NEE}$$



Bruto fotosinteza.
Absorpcija CO₂
zaradi ozelenitve in
daljših poletij.
(VNOS V SISTEM)



Dihanje ekosistema.
Emisije iz tal in
razkroj zaradi višjih
temperatur.
(IZHOD IZ SISTEMA)

**Neto ekosistemska
izmenjava.**
Negativna vrednost =
PONOR (Sink).
Pozitivna vrednost =
VIR (Source).

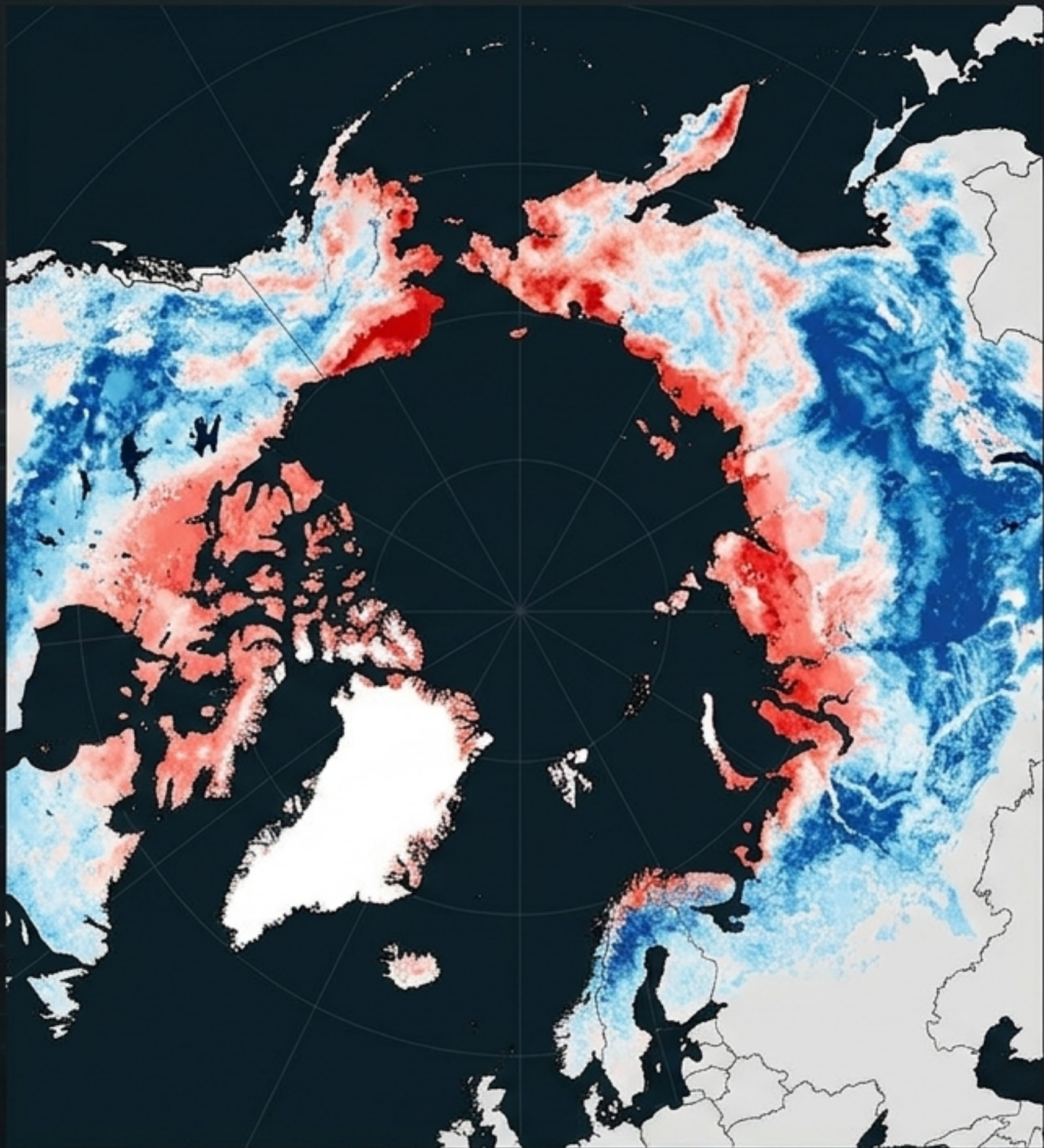
$-548 \pm 140 \text{ Tg C leto}^{-1}$



Trend: $-14 \text{ Tg C leto}^{-1}$
(Povečevanje kapacitete ponora, $P < 0.001$)

Celotna Arktično-borealna cona (ABZ) je v obdobju 2001–2020 delovala kot zanesljiv kopenski ponor CO_2 . GPP (vnos) narašča hitreje kot Reco (izhod).

Region	NEE (Tg C leto^{-1})	GPP (Tg C leto^{-1})	Reco (Tg C leto^{-1})
ABZ	$-548 (\pm 140)$	$9,970 (\pm 144)$	$9,525 (\pm 90)$



34%

celotnega območja
ABZ je neto vir CO₂.

41%

področja s
permafrostom deluje
kot neto vir CO₂.

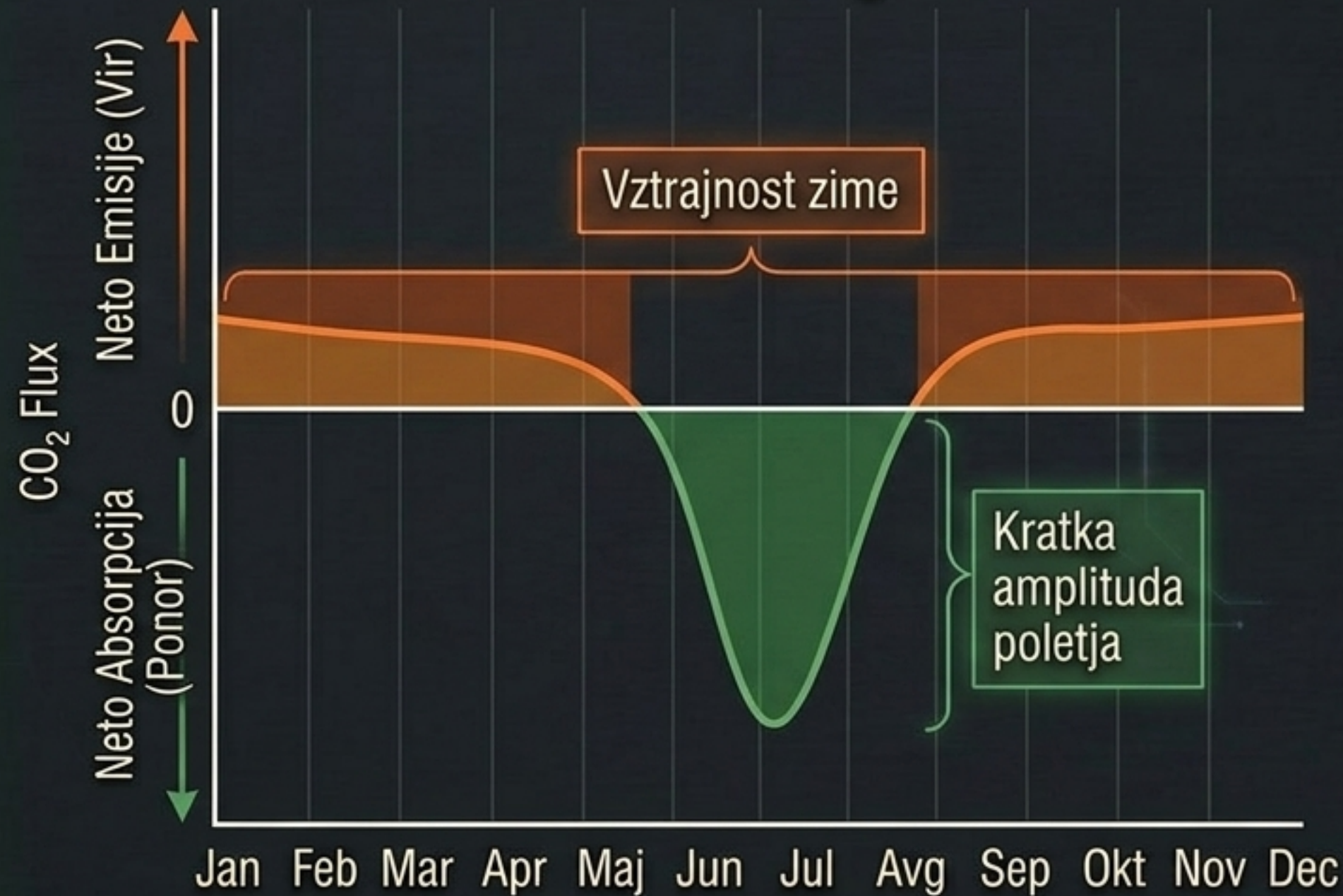
Povprečja maskirajo lokalne okvare.
Kljub rastočemu ponoru je skoraj tretjina
celotnega območja prešla v cono emisij,
predvsem v severnih predelih.

Matrika diagnostike ekosistemov

	TUNDRA	BOREAL / TAJGA
Sistemska vloga (Povprečje 2001-2020)	Nevtralno / Rahli vir (+45 Tg C leto ⁻¹)	Močan ponor (-593 Tg C leto ⁻¹)
Faktor absorpcije (GPP)	Nizek (300 g C m ⁻² leto ⁻¹)	Visok (572 g C m ⁻² leto ⁻¹)
Faktor emisij (Reco)	Prevladujoč vpliv dolge zime.	Absorpcija poletja presega emisije.

Sistemska razhajanja: Borealni gozd ohranja status quo zaradi dolgih poletij, medtem ko Tundra zaradi sistemske šibkosti počasi prehaja v fazo sproščanja ogljika.

Sezonski tok CO₂ v Tundri



Izziv amplitude in vztrajnosti: Kljub ozelenitvi in višji poletni absorpciji, sistem propada zaradi podaljšanih jesenskih in zimskih emisij.

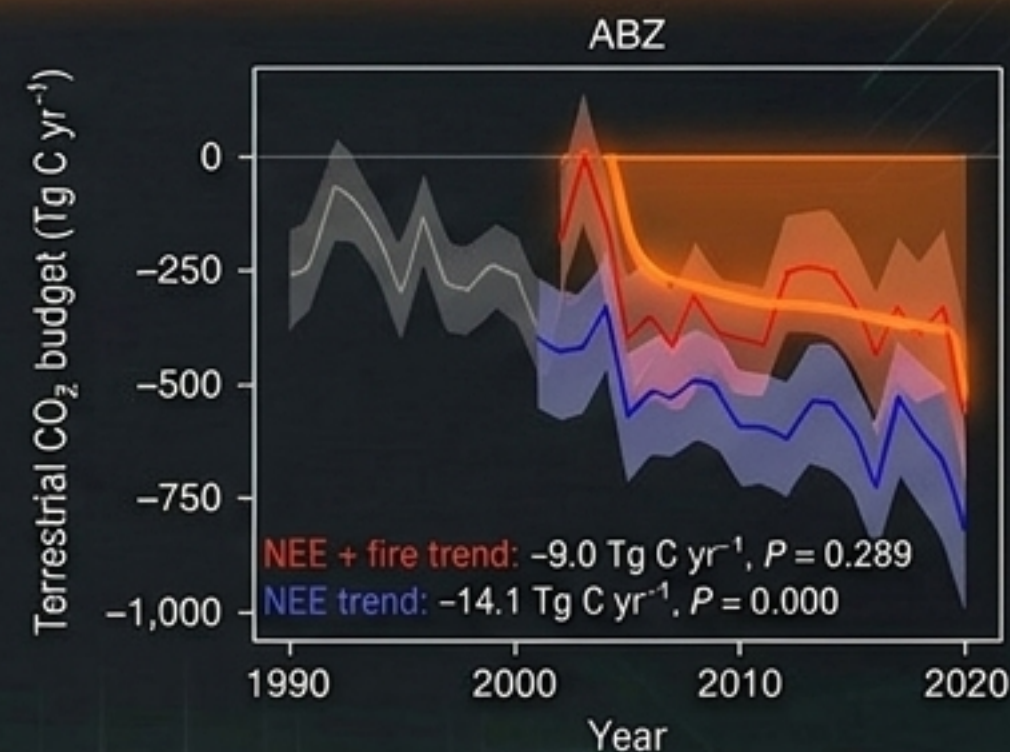
Vloga Tundre: Tisočletna shramba ogljika postaja vir, saj dolgotrajne zimske emisije neprestano preglasijo kratke poletne dobičke.

SISTEMSKI ŠOK: INTERVENCIJA POŽAROV

$$\text{GPP} - \text{Re}_{\text{CO}} + \text{POŽARI} =$$

Končni izkupiček pade na:
-319 Tg C leto⁻¹

Sistemiški šok: S faktorjem požarov povečevanje kapacitete sistemskega ponora NI VEČ STATISTIČNO ZNAČILNO (trend pade na -9 Tg C leto⁻¹, $p=0.289$).





Brez požarov:
 $-249 \text{ Tg C leto}^{-1}$
(Zdrav ponor)

S požari:
 $-24 \pm 123 \text{ Tg C leto}^{-1}$

Nevtralizacija permafrosta.

Ko upoštevamo emisije gozdnih požarov v arktičnih conah (500-m resolucija), območje permafrosta matematično postane ogljično nevtravno. Milenijske zaloge ogljika se začenjajo destabilizirati.

Sistemska napaka strojnega učenja (ML Bias)



Leto 0: Požar



Leto 7-10: Vrhunec
napake modela

Leto 10+: Začetek
resnične obnove

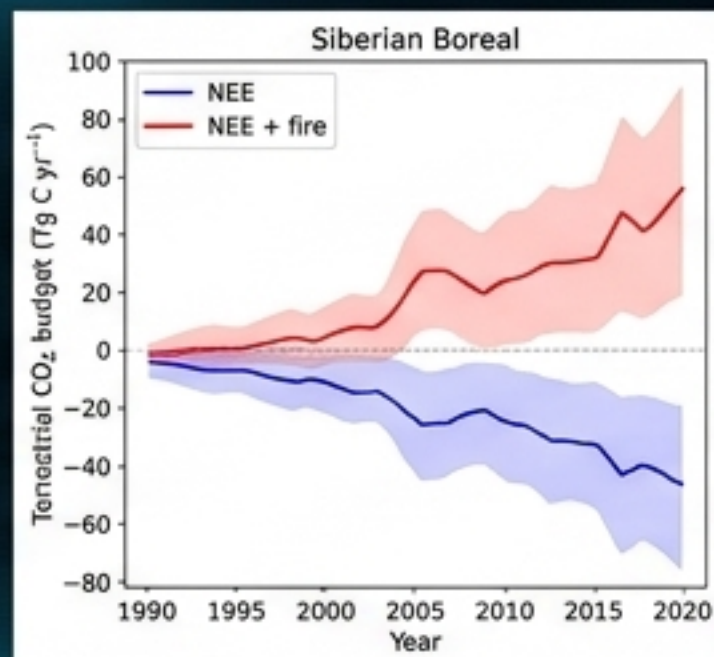
Zakasnela povratna zanka: Diagnostika je pokazala, da ML modeli v prvih 7 do 10 letih po požaru precenjujejo sposobnost sistema kot ponora ogljika (pozitivni bias). Ekosistem se šele kasneje začne dejansko obnavljati s povečanim GPP prek rasti grmičevja.

Takeaway: Požar deluje kot dvostopenjski udar – takojšnja emisija CO₂ in dolgotrajna paraliza fotosinteze.



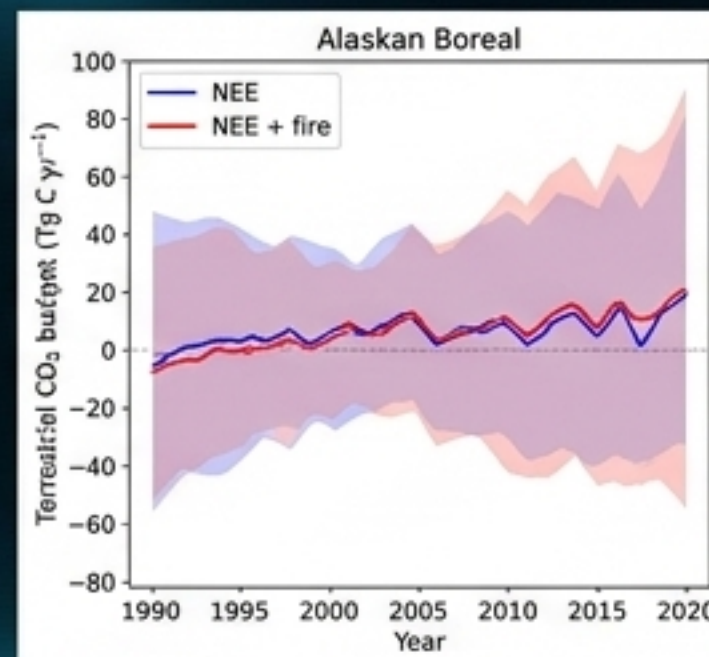
SIBIRIJA

Najmočnejša ozelenitev in ponor (GPP), a izjemne ognjene emisije povzročijo izravnavo. Najvišja stopnja negotovosti podatkov.



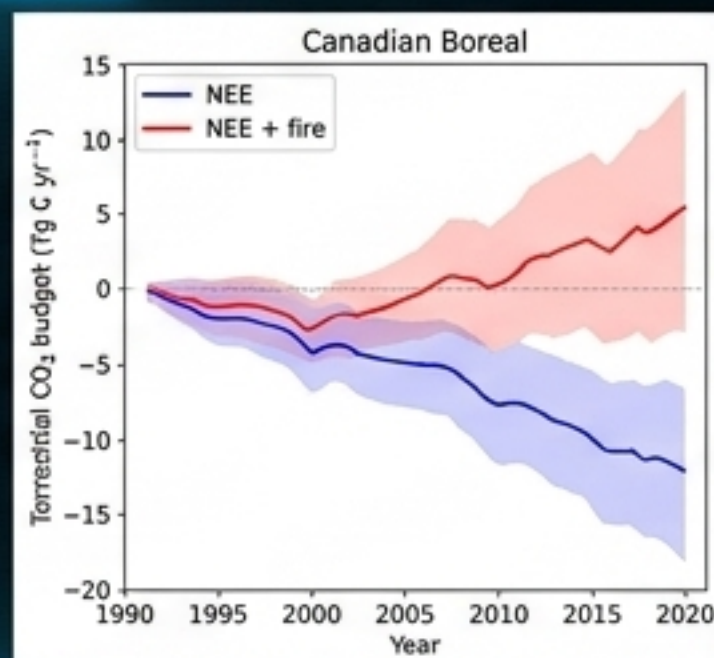
ALJASKA

Konstanten neto vir ali nevtralno območje. Ekstremno hitro segrevanje jeseni.



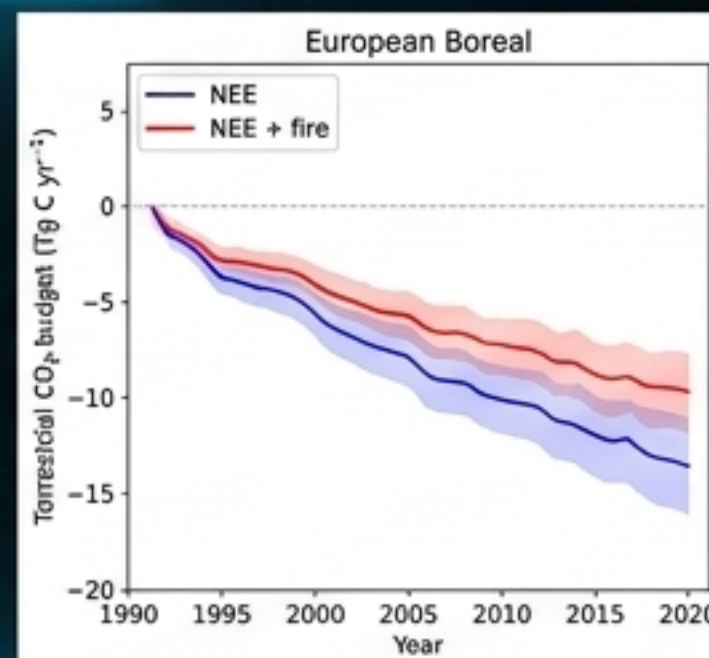
KANADA

Zmeren trend rastočega vira in požarov, a ohranja varen borealni ponor.



EVROPA

Stabilen ponor, območje z najmanjšim vplivom masivnih požarov.

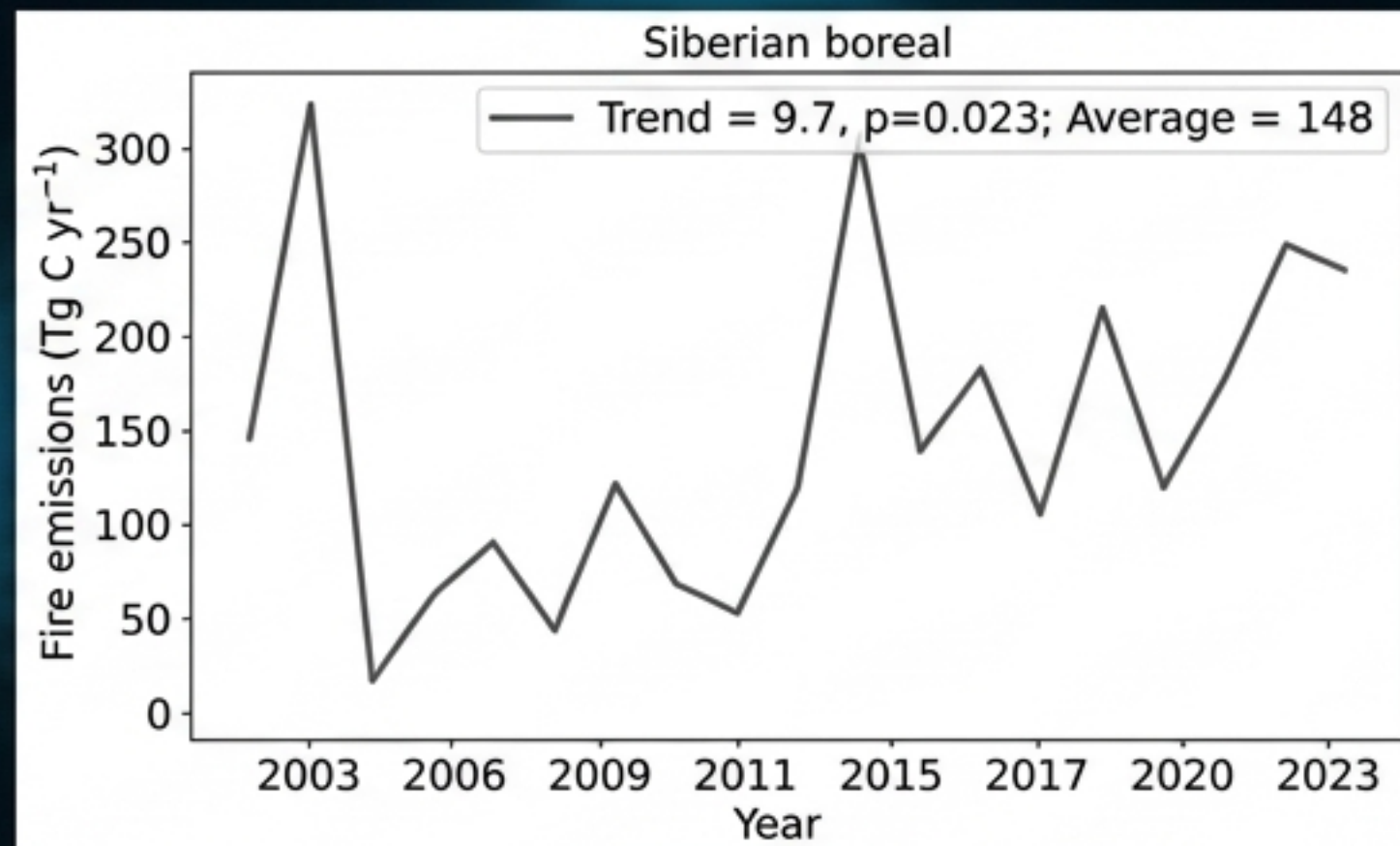


Sibirski paradoks moči

Najmočnejše 'ozelenjevanje'
– v modelu (GPP) ustvarja
neverjeten ponor. Vendar ga
požari popolnoma izničijo.

Ognjene emisije:
 $+160 \text{ Tg C leto}^{-1}$

Skupni trend (NEE + Požari):
 $+0.7 \text{ Tg C leto}^{-1}$ (Prehod v izvor)



Inženirska slepa pega: Regija vsebuje več kot polovico ogljika permafrosta, vendar ima najmanjšo gostoto avtonomnih senzorskih postaj na terenu.

Aljaška anomalija

The Data

Aljaska ne deluje kot ponor, temveč dosledno kot neto vir (ali nevtralno področje).

Tundra: +7 Tg C leto⁻¹

Tajga: +5 Tg C leto⁻¹

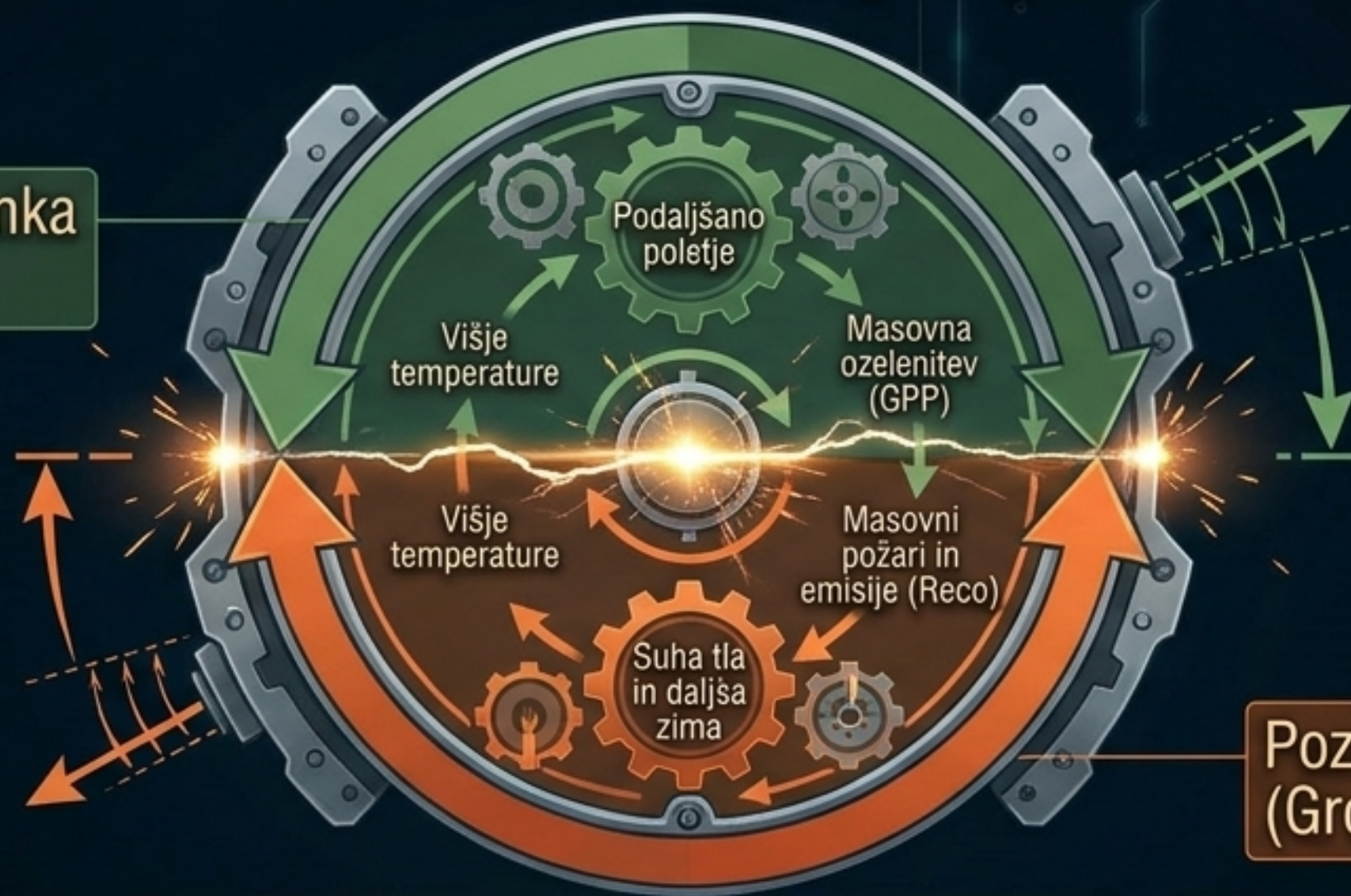


Hitro segrevanje in taljenje permafrosta

Zelo visoka gostota senzorskih podatkov dokazuje hitro segrevanje jeseni. Glavni motilec je pospešeno taljenje permafrosta (termokraško posedanje) – spremenljivka, ki je prostorski modeli v tej resoluciji še ne znajo pravilno integrirati.

Sistemiški spopad

Negativna zanka
(Blaženje)



Pozitivna zanka
(Grožnja)

Sistemiški spopad: Doslej je Zelenitev še **uspevala premagovati Dihanje tal**. Toda ob vnosu ekstremnih motilcev (Požari) matematični trendi kažejo opozorilni znak: Sistem prehaja kritično mejo in grozi preobrat v pozitivno povratno zanko.

Inženirski izzivi za prihodnost (Kaj potrebujemo?)



Senzorika in Hardware

Potreba po več 365-dnevni avtonomni merilni postaji (IoT / eddy covariance) v kritičnih 'črnih pegah', predvsem v osrednji Sibiriji in kanadski Arktiki.



Telemetrija in Radar

Al modelom manjka natančen opis vlažnosti tal. Satelitska resolucija volumetrične vode je preslaba in vsebuje preveč šuma. Potrebujemo boljše radarske/mikrovalovne rešitve v visoki resoluciji.



Programska arhitektura

Nujna integracija dinamičnih procesov s sub-metrsko natančnostjo – algoritmi za zaznavanje posedanja tal (thermokarst) in obnovo mikro-lokacij neposredno po požaru.

Reševanje planetarnega sistema se začne z natančnejšim merjenjem njegovih okvar.

Podatki pridobljeni iz baze meritev ABCflux in z obdelavo satelitskih MODIS ter ERA5 sistemov.

Izvirni raziskovalni članek: "Wildfires offset the increasing but spatially heterogeneous Arctic–boreal CO₂ uptake", Nature Climate Change, 2024.

Odprtokodna arhitektura modela in podatkovna baza sta dostopni za nadaljnjo inženirsko obdelavo (Referenca na FLUXCOM-X).

