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

Õhuke, poolenisti sulanud esimene maakoor: mudel, milles hadeikumi juhtisid kokkupõrked, mitte sisemine soojus

Maa esimene eoon, hadeikum, jättis peaaegu olematu kivimiarhiivi. See modelleerimisuuring küsib, milline oleks maakoor olnud, kui kokkupõrkeid enam ei eirata. Kasutades stohhastilist, ajas vähenevat kokkupõrkevoo mudelit ja valideeritud maakoore ning vahevöö soojusvoo simulatsioone, leiavad autorid, et kokkupõrkesoojus oleks suurema osa hadeikumi jooksul ületanud kogu Maa sisemise soojuse vähemalt suurusjärgu võrra, jättes maakoore õhukeseks (alla ~5 km) ja osaliselt sulanuks juba mõne kilomeetri sügavusel — nende hinnangul liiga nõrgaks laamtektoonika jaoks ning altid tagasi vahevöösse ringlusse minema, mis seletaks hadeikumi aine vähest säilimist. Kui kokkupõrked pärast ~3,9 Ga (umbes 3,9 miljardit aastat tagasi) vaibusid, sai püsiv mandriline maakoor tekkida just ajal, mil ilmuvad vanimad säilinud felsilised kivimid — autorite ettevaatlikus sõnastuses „tõenäoliselt mitte kokkusattumus". Kuna kasutati teadlikult konservatiivset alumise piiri soojendust, on kvalitatiivne tulemus robustne, kuigi täpsed arvud pole fikseeritud. See on tugev ja koherentne Maa lapsepõlve mudel — mitte otsene vaatlus.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

Maa loo peatükk, millest peaaegu ühtegi lehekülge alles pole

Maa on ainus meile teadaolev planeet, millel on mandrid — ujuv, ränirikas maismaa, millel me kõik elame. Ometi on mandrite algne teke üks geoloogia vanimaid lahendamata probleeme ja jõhkral põhjusel: tõendid on peaaegu täielikult kadunud.

Maa esimene eoon, hadeikum, kestab planeedi sünnist umbes 4,03 miljardi aasta (Ga) taguse ajani. Sellest esimesest poolest miljardist aastast pole peaaegu midagi säilinud. Vanimad terviklikud felsilised ehk mandritüüpi kivimid on umbes 4,03 Ga vanad. Mõned haruldased basaltkivimid ulatuvad ~4,2 Ga-ni. Kõige vanem üldse säilinud materjal on hajus hulk tsirkoonikristalle — kuulsaimad Lääne-Austraalia Jack Hillsist — vanusega kuni 4,4 Ga. See on kogu Maa lapsepõlve arhiiv: käputäis leiukohti ja mõned liivaterasuurused mineraalid.

See uuring ei lisa arhiivi uut kivimit. See teeb midagi muud: ehitab füüsikalise mudeli sellest, milline hadeikumi maakoor nende füüsikaseaduste all oleks olnud, ning küsib küsimuse, mille enamik varase Maa mudeleid välja jätab. Mis juhtub siis, kui me enam ei eira tõsiasja, et varast Maad pommitati pidevalt?

Autorite vastus on tähelepanuväärne. Suurema osa hadeikumi jooksul oleks kokkupõrgete toodud soojus ületanud kaugelt kogu Maa sisemise soojuse, jättes koore õhukeseks ja osaliselt sulanuks — autorite arvates liiga nõrgaks, et midagi tänapäevase laamtektoonika sarnast toimiks. See on mudel, mitte mälestus. Kuid vähemalt püüab see mudel arvesse võtta ajastu vägivalda, mida ta kirjeldab.

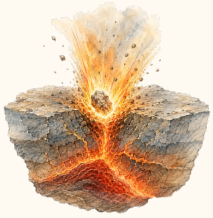
A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

Impact heat dominates

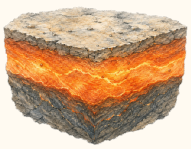
At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.



Consequence

Thin, shallowly molten crust

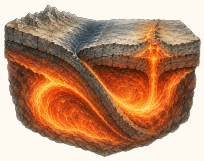
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

Kokkupõrkesoojus domineerib mudeli energiabilansis, õhuke madalalt sulanud maakoor taaskasutab end ning püsiv mandriline maakoor ilmub alles umbes 4,0–3,9 Ga üleminekul. See on hadeikumi mudel, mitte selle otsene mälestus.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mida autorid tegid

Meeskond ühendas kolm komponenti, mida tavaliselt käsitletakse eraldi.

Esiteks **kokkupõrkevoo stohhastiline mudel** — asteroidide ja suuremate kehade sadu, mis tabas Päikesesüsteemi siseosa hadeikumi ja varase arhaikumi jooksul. Oluline on, et see pole vana idee ühest järsust „hilise raskepommitamise" tipust. Voog on alguses intensiivne ja **väheneb aja jooksul**, suurte kokkupõrgete saabumine on juhuslik ehk stohhastiline, mitte ajakava järgi. Mudel on skaleeritud Kuu ja Päikesesüsteemi siseosa kokkupõrkestatistikast ning valitud sobima tsirkoonide vanusespektri ja olemasolevate paleomagnetiliste tõenditega.

Teiseks **geodünaamilised simulatsioonid** sellest, kuidas soojus liigub maakoores ja ülemises vahevöös. Nad kasutasid valideeritud lattice-Boltzmanni koodi Planet_LB, tehes nii lihtsaid ühemõõtmelisi temperatuuri-sügavuse arvutusi kui ka täielikke kahemõõtmelisi vahevöö konvektsiooni hetkvõtteid 4,1 Ga juures. Need sisaldavad tavalisi sisemisi soojusallikaid — radioaktiivset lagunemist ja tuuma soojust — ning olulise lisana **magmalist advektsiooni**: üles kerkiva sulaga transporditavat soojust, mille enamik maakoore soojusmudeleid välja jätab.

Kolmandaks **faasitasakaalu modelleerimine** realistliku varase maakoore jaoks — Nuvvuagittuqi rohekivöö hüdreeritud hadeikumi metabasaldi põhjal — et leida, millisel temperatuuril ja sügavusel selline kivim sulama hakkaks.

Üks metodoloogiline valik määrab, kuidas kogu tööd lugeda: autorid seadsid teadlikult eeldused *oma järelduse vastu*. Nad eeldasid „mittekondriitset" vahevööd, milles on vähem soojust tootvat radioaktiivset materjali kui kondriitses võrdlusmudelis, andes alla poole standardmudeli sisemisest soojendamisest; kasutasid konservatiivseid soojendusmäärasid ning jätsid välja noore ja lähedase Kuu loodete soojenduse. Seega on arvutatud maakoore temperatuurid **miinimumid** ehk alumised piirid. Kui üldse, oli tegelik hadeikum mudelist kuumem.

Mida nad leidsid

Hadeikumi energiabilanssi domineerisid kokkupõrked, mitte sisemine soojus. Kui kokkupõrkesoojus ajas integreerida, ületab see sisemise panuse suurema osa hadeikumi jooksul vähemalt suurusjärgu võrra. Selles pildis on varase tektoonilise aktiivsuse peamine mootor kokkupõrkesoojus, mitte radioaktiivne lagunemine, ning see taandub kõrvaliseks alles umbes **3,9 Ga** järel.

See soojus hoidis maakoore õhukese ja madalalt sulanuna. Ilma kokkupõrgete ja sulamagna advektsioonita annab mudel hadeikumi maakoore, mis on osaliselt sulanud alles umbes 10–15 km sügavusest allpool. Lisa kokkupõrkesoojus ja sulamisvöönd tõuseb järsult: maakoor on osaliselt sulanud juba vaid **mõne kilomeetri sügavusel** (umbes 2–5 km allpool). Ligikaudu 5 km sügavusel ennustavad mudelid üle 30% sulamit — seisundit, kus kivim on liiga nõrk, et püsida jäiga laamana. 5–10 km

sügavusel tähendab ~1000–1100°C, et maakoor on koostisest peaaegu sõltumata ulatuslikult sulanud. Säilinud tahke maakoor oleks olnud **õhuke, alla umbes 5 km**.

Poolenisti sulanud maakoor kustutab iseenda. Ulatuslik sulamine laseb tihedal raua- ja magneesiumirikkal materjalil vajuda ja eralduda, samal ajal kui kergemad ränirikkad sulad tõusevad. Aja jooksul nihutab see maakoore keskmise koostise rohkem arenenud, ränirikka koostise poole ning tekitab sellist felsilist sulamit, millest võib kristalliseeruda tsirkoon. Peaaegu kogu see õhuke maakoor oleks seejärel tagasi konvekteerivasse vahevöösse ringlusse läinud, mis sobib keemilise ehk isotoopse andmestikuga. Selles mudelis pole hadeikumi kivimite peaaegu täielik puudumine arhiiviauk — see on *ennustus*. 4,2 Ga kivimid ja 4,4 Ga tsirkoonid on haruldased ellujääjad maakoorest, mis hävis peaaegu sama kiiresti kui tekkis.

Pommitamise lõpp langeb kokku esimeste püsivate mandritega. Kui pommitamine 4,0–3,9 Ga üleminekul vaibus, sai maakoor lõpuks pakseneda ja püsima jääda. Vanimad säilinud mandrilised kivimid ilmuvad umbes samal üleminekul. Autorid sõnastavad ettevaatlikult: see, et püsiv mandriline maakoor ilmus just siis, „pole tõenäoliselt kokkusattumus".

Nende peamine järeldus: sellistes tingimustes — õhuke maakoor, mõne kilomeetri sügavusel sulanud — on **hadeikumi laamtektoonika ebatõenäoline**.

Samuti näitavad nad, miks varasemad tööd jõudsid vastupidisele järeldusele. Varasemad stohhastiliste kokkupõrgete uuringud leidsid ainult väikese mõju, kus korraga oli sulanud alla 2,5% maakoorest. Need uuringud jätsid välja kaks asja, mis selles töös on sees: suurte kokkupõrgete globaalne mõju sügava vahevöö sulamisele ning selle soojuse ülespoole transport tõusva magma kaudu. Kui need tagasi lisada, muutub termiline pilt järsult.

Miks mudel ei ole mälestus

Kõik eespool on simulatsioonide väljund, mitte hadeikumi kivimitest võetud mõõtmine — sest neid kivimeid peaaegu enam pole. See ei tee tulemust nõrgaks, kuid määrab, mis tüüpi tulemus see on.

Ahel kulgeb nii: kokkupõrkevoo *mudel* toidab vahevöö ja maakoore soojusvoo *mudelit*, mida kontrollitakse konkreetse kivimi sulamise *mudeli* vastu. Iga lüli on füüsikaliselt põhjendatud ja võimaluse korral valideeritud — kuid tervik on koherentne argument selle kohta, milline hadeikum *pidi* usutava füüsika korral olema, mitte mõõtmine selle kohta, milline see *tegelikult* oli.

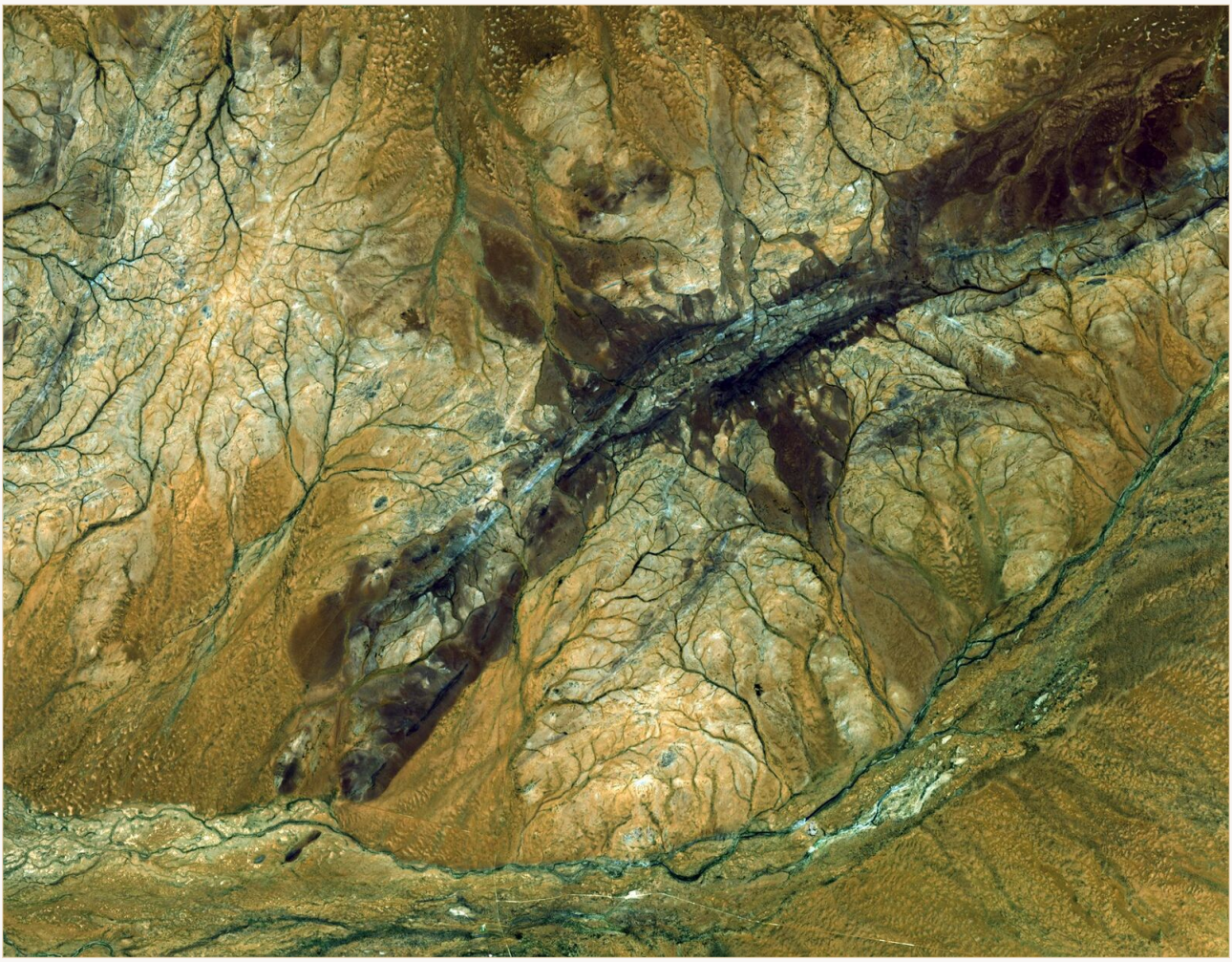
Seepärast on autorite konservatiivsed eeldused olulisemad, kui esmapilgul tundub. Kuna nad valisid alumise piiri soojenduse ja said ikkagi laialdaselt sulanud madala maakoore, on kvalitatiivne järeldus — hadeikumi maakoor oli kuum ja nõrk — valikute suhtes vastupidav. Mis *pole* sellega täpselt määratud, on arv: täpsed geotermid, täpsed sulamisosad, täpne maakoore paksus. Tulemuse suunda tasub lugeda tugevana ja komakohti esialgsetena.

Mida see *ei* tõesta

- See **ei** vaatle hadeikumi maakoort otse. Sellest ajastust pole peaaegu üldse kivimeid; see on modelleerimistulemus selle kohta, mida füüsika eeldab, mitte mõõtmine.
- See **ei** tugine „hilisele raskepommitamisele". Kasutatud kokkupõrkevoog on vähenev ja stohhastiline — mudel ei vaja ega eelda järsku pommitamistippu.
- See **ei** lahenda laamtektoonika vaidlust. „Ebatõenäoline" on siin tugev ja füüsikaliselt põhjendatud järeldus kuuma, stagnant-lid või squishy-lid tüüpi varase Maa kasuks — kuid hadeikumi tektooniline režiim on endiselt päriselt vaidlusalune.
- See **ei** tõesta, et kokkupõrked *põhjustasid* mandrite ilmumise umbes 4,0–3,9 Ga üleminekul. Ajastuse kokkulangevus on tugev seos, mida autorid ise nimetavad „tõenäoliselt mitte kokkusattumuseks" — see on ettevaatlik sõnastus veenva korrelatsiooni, mitte demonstreeritud põhjuse kohta.
- Jack Hillsi tsirkoonid **ei ole** säilinud mandrid. Need on haruldased säilinud terad, mis näitavad, et felsiline materjal ja vesi eksisteerisid vara; mudeli mõte on just selles, et neid tootnud maakoor läks enamasti ringlusse.
- See **ei** rekonstrueeri varase Maa täielikku ajalugu. Simulatsioonid on idealiseeritud — 1D profiilid ja 2D ekvatoriaalsed lõiked, kus kokkupõrked on piiratud ekvaatori lähedale ning kujutatud ajas hetkvõtetena — mitte planeedi täielik neljamõõtmeline mudel.

Kui tugevad on tõendid?

Keskse väite puhul — et kokkupõrkesoojus oli hadeikumi maakoore esimese järgu kontrolltegur, hoides selle õhukese ja madalalt sulanuna — on argument koherentne ja olulises mõttes konservatiivne. See kasutab valideeritud geodünaamikakoodi, füüsikaliselt mõistlikke sisendeid ja alumise piiri eeldusi ning lisab soojusallika, mida enamik varasemaid mudeleid lihtsalt eiras. Usutavust lisab ka see, et ühe korraga seletatakse kahte kangekaelset fakti: miks peaaegu ühtegi üle ~4 Ga vanust kivimit ei säili (peaaegu täielik ringlussevõtt) ning miks püsiv maakoor ilmub just pommitamise vaibudes.



Jack Hills Lääne-Austraalias NASA ASTER-instrumendi vaates. Selle piirkonna tsirkoonide hulgas on osa vanimast teadaolevast Maa varase maakoore säilinud ainest — pisikesed vihjed eoonist, mille kivimid peaaegu täielikult kustutati.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Piirid on sama selged ning need on iga nii sügava aja mudeli piirid: mudelid on ehitatud mudelite peale ja ankurdatud väga hõredasse kivimiarhiivi ning kõige tsiteeritavam järeldus — „laamtektoonika on ebatõenäoline" — on järeldus, mitte vaatlus. Õige hoiak on käsitleda seda tugeva ja hästi põhjendatud hüpoteesina, mis raamib hadeikumi ümber ja kutsub nüüd teisi selle eeldusi — eriti kokkupõrkevoo mudeli valikut — testima, mitte lõpetatud juhtumina.

Kõige kasulikum kokkuvõte pole ei „selline hadeikum oligi" ega „see on lihtsalt simulatsioon". Pigem: usutava ja konservatiivse füüsika korral oleks tugevalt pommitatud varasel Maal olnud õhuke, poolenisti sulanud, ennast ringlusse võttev maakoor — ning see üks idee seletab üllatavalt palju sellest vähesest, mida me tegelikult näha saame.

Miks see oluline on

Populaarne kujutlus varasest Maast kipub kõikuma kahe äärmuse vahel: rahulik, laamtektooniline veemaailm, peaaegu nagu tänapäeval, või põrgulik laavaplaneet. See töö visandab konkreetse füüsikaliselt motiveeritud kesktee: õhuke maakoor, mida mõne kilomeetri sügavuselt korduvalt ümber sulatati, pidevalt hävitati ja uuesti loodi, kus tingimused määrasid kokkupõrked, mitte sisemine soojus.

Selline ümberraamistus teeb päris tööd. See pakub ühe mehhanismi kahele Maa lapsepõlve suurimale faktile — kivimiarhiivi peaaegu täielikule puudumisele ja esimeste püsivate mandrite ajastusele — ning tõstab tavaliselt eiratud protsessi, kokkupõrkesoojuse, loo keskmesse. Kui idee vastu peab, muudab see seda, kuidas mõtleme ajast, mil Maast üldse sai stabiilsete mandrite planeet, ning kandub üle teistele kiviplaneetidele, mis tekkisid oma pommitamisajaloo all.

Miski sellest ei nõua, et mudel oleks viimane sõna. Piisab, et see on testimiseks piisavalt hea hüpotees — ja sidudes end säilinud tsirkooni- ning isotoobiandmestikuga, seda ta on. Pealkirja „peidetud hadeikum" ongi asja mõte: ajastu, milleni saame enamasti jõuda ainult modelleerides, sest ajastu kustutas enda tõendid.

Lühidalt

Maa esimene eoon, hadeikum (enne ~4,03 Ga), jättis peaaegu olematu kivimiarhiivi. See modelleerimisuuring küsib, milline oleks maakoor olnud, kui lisada soojusallikas, mis tavaliselt välja jäetakse: kokkupõrked. Kasutades stohhastilist, ajas vähenevat kokkupõrkevoo mudelit koos valideeritud 1D ja 2D simulatsioonidega maakoore ja vahevöö soojusvoost, sealhulgas tõusva sulaga transporditud soojusest, leiavad autorid, et ajas integreeritud kokkupõrkesoojus oleks suurema osa hadeikumi jooksul ületanud kogu Maa sisemise soojuse vähemalt suurusjärgu võrra. Tulemuseks on õhuke maakoor (alla ~5 km), mis on osaliselt sulanud juba mõne kilomeetri sügavusel ja ~5 km juures üle 30% ulatuses — liiga nõrk laamtektoonika hoidmiseks, mida autorid peavad hadeikumis ebatõenäoliseks. Selline maakoor läheks enamasti tagasi vahevöösse ringlusse, selgitades, miks hadeikumi ainet nii vähe säilib; kui kokkupõrked 4,0–3,9 Ga üleminekul vaibusid, sai moodustuda püsiv mandriline maakoor umbes samal ajal, kui ilmuvad vanimad säilinud felsilised kivimid — autorite ettevaatlikus sõnastuses „tõenäoliselt mitte kokkusattumus". Kuna autorid kasutasid teadlikult konservatiivset alumise piiri soojendust, on kvalitatiivne tulemus robustne, kuigi täpsed arvud pole lukus. See on tugev ja koherentne Maa lapsepõlve mudel — mitte otsene vaatlus.

Ilustamata kontroll

Mida töö näitab: Füüsikaliselt põhjendatud simulatsioonides, mis sisaldavad kokkupõrkesoojust ja magmaatilist soojustransporti, tuleb hadeikumi maakoor välja õhukese ja osaliselt sulanuna juba mõne kilomeetri sügavusel, kokkupõrkesoojuse, mitte sisemise soojuse domineerituna, enamasti

tagasi vahevöösse ringlusse võetuna ning — selles mudelis — laamtektoonikat mitte kandvana.

Mis on usutav, kuid tõestamata: Et kokkupõrked on põhjus, miks püsivad mandrid ilmuvad umbes 3,9 Ga; et hadeikum oli stagnant-lid või squishy-lid maailm, mitte varase laamtektoonikaga maailm; et hadeikumi kivimeid säilib peaaegu üldse mitte just seetõttu, et sulanud maakoor ise ringlusse läks.

Mida see ei näita: Hadeikumi maakoore otsest mõõtmist; laamtektoonika vaidluse lõplikku vastust; tõendatud põhjuslikku seost pommitamise vaibumise ja esimeste mandrite vahel; et Jack Hillsi tsirkoonid esindavad säilinud mandreid; varase planeedi täielikku mudelit.

Peamised piirangud: Hadeikumi kivimiarhiiv on peaaegu olematu, seega piirab mudelit väga vähe andmeid; see laob mudelid mudelite peale (kokkupõrkevoog → geodünaamika → faasitasakaal); kokkupõrkevoog ise on esinduslik, kuid ebakindel valik; simulatsioonid on idealiseeritud (1D ja 2D ekvatoriaalsed lõiked, ajas hetkvõtted). Konservatiivsed alumise piiri eeldused tugevdavad kvalitatiivset järeldust, kuid ei tee konkreetseid geoterme täpseks.

Kui palju võiks tavalugeja seda usaldada? Kõrge kindlus, et usutava füüsika korral oleks tugevalt pommitatud varasel Maal olnud kuum, õhuke ja madalalt sulanud maakoor. Mõõdukas kindlus, et see muudab hadeikumi laamtektoonika ebatõenäoliseks ja aitab selgitada puuduvat kivimiarhiivi. Madal kindlus mis tahes väites, et see *tõestab*, kuidas mandrid tekkisid või täpselt millal — see on tugev, konservatiivne hadeikumi ümberraamistav mudel, mitte otsene pilk sellesse aega.

Allikad

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402