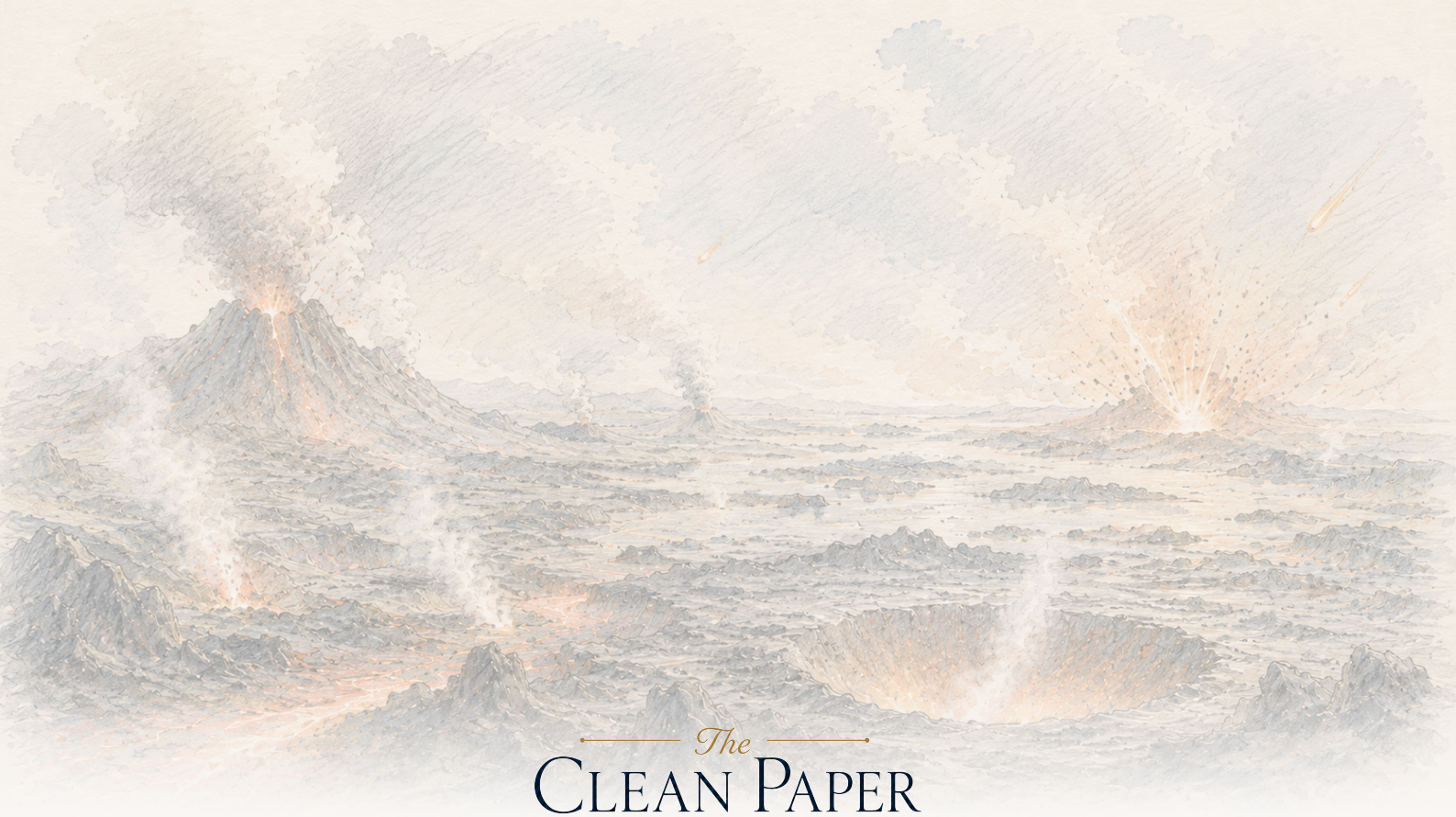


The Clean Paper

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

Tanka, napola rastaljena prva kora: model u kojem su Had oblikovali udari, a ne unutarnja toplina

Prvi Zemljin eon, Had, ostavio je gotovo nikakav stijenski zapis. Ova studija modeliranjem pita kakva bi kora bila kada se prestanu ignorirati udari. Koristeći stohastički model opadajućeg toka udara i provjerene simulacije protoka topline kroz koru i plašt, autori nalaze da bi toplina udara veći dio Hada nadmašivala svu Zemljinu unutarnju toplinu za najmanje red veličine, ostavljajući tanku koru (ispod ~5 km) djelomično rastaljenu već nekoliko kilometara ispod površine — preslabu, tvrde, za tektoniku ploča i sklonu recikliranju natrag u plašt, što bi objasnilo zašto je tako malo hadejskog materijala preživjelo. Kako su udari slabili nakon ~3.9 Ga (prije oko 3.9 milijardi godina), trajna kontinentalna kora mogla se formirati upravo kada se pojavljuju najstarije preživjele felsične stijene — „vjerojatno nije slučajnost", prema opreznoj formulaciji autora. Budući da su namjerno koristili konzervativno zagrijavanje donje granice, kvalitativni rezultat robustan je iako točne brojke nisu fiksne. To je snažan, koherentan model Zemljina djetinjstva — ne izravno opažanje.

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

Poglavlje Zemljine priče iz kojeg gotovo nijedna stranica nije ostala

Zemlja je jedini planet za koji znamo da ima kontinente — uzdignuta, silicijem bogata kopna na kojima živimo. Ipak, način na koji su prvi kontinenti nastali jedan je od najstarijih neriješenih problema geologije, i to iz brutalno jednostavnog razloga: gotovo svi dokazi su nestali.

Prvi Zemljin eon, Had, proteže se od nastanka planeta do prije oko 4.03 milijarde godina (Ga). Iz tih prvih pola milijarde godina gotovo ništa nije preživjelo. Najstarije cjelovite felsične stijene, tipične za kontinentalnu koru, stare su oko 4.03 Ga. Nekoliko rijetkih bazaltnih stijena doseže ~4.2 Ga. Najstariji materijal bilo koje vrste tek je raspršen skup kristala cirkona — najpoznatiji iz Jack Hillsa u Zapadnoj Australiji — datiranih na 4.4 Ga. To je praktički cijeli arhiv Zemljina djetinjstva: nekoliko lokaliteta i minerali veličine zrna pijeska.

Ova studija tom arhivu ne dodaje novu stijenu. Radi nešto drugo: gradi fizikalni model izgleda hadejske kore pod tadašnjom fizikom i postavlja pitanje koje većina modela rane Zemlje izostavlja. Što se dogodi kada prestanete ignorirati činjenicu da je rana Zemlja bila bombardirana?

Odgovor autora je upečatljiv. Veći dio Hada toplina unesena udarima premašivala bi svu unutarnju Zemljinu toplinu, ostavljajući koru tankom i djelomično rastaljenom — preslabom, tvrde autori, za išta nalik današnjoj tektonici ploča. To je model, ne sjećanje. Ali model koji, za promjenu, pokušava uključiti nasilje razdoblja koje opisuje.

A model of the Hadean, not a memory of it

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

Energy

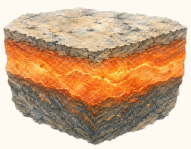
Impact heat dominates

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

Consequence

Thin, shallowly molten crust

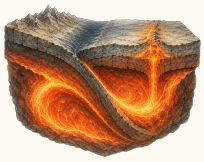
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



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

Toplina udara dominira energetskim proračunom modela, tanka plitko rastaljena kora sama se reciklira, a trajna kontinentalna kora pojavljuje se tek oko prijelaza 4.0–3.9 Ga. To je model Hada, ne izravno sjećanje na njega.

The Clean Paper CC BY 4.0

Što su autori napravili

Tim je spojio tri sastojka koji se obično promatraju odvojeno.

Prvo, **stohastički model toka udara** — kiše asteroida i većih tijela koja su pogađala unutarnji Sunčev sustav tijekom Hada i ranog Arhaika. Presudno, to nije stara ideja o jednom naglom vrhuncu „Late Heavy Bombardmenta". Tok je vrlo snažan rano i **opada s vremenom**, a veliki udari dolaze nasumično, stohastički, a ne prema rasporedu. Model je skaliran iz statistike udara na Mjesec i unutarnji Sunčev sustav te odabran tako da bude usklađen sa spektrima starosti cirkona i dostupnim paleomagnetskim dokazima.

Drugo, **geodinamičke simulacije** prijenosa topline kroz koru i gornji plašt. Koristili su provjereni lattice-Boltzmannov kod Planet_LB, izvodeći i jednostavne jednodimenzionalne profile temperature s dubinom i potpune dvodimenzionalne snimke konvekcije plašta na 4.1 Ga. Uključili su uobičajene unutarnje izvore topline — radioaktivni raspad i toplinu jezgre — te, važno, **magmatsku advekciju**: toplinu koju prema gore prenosi uzlazna talina, a koju većina toplinskih modela kore izostavlja.

Treće, **modeliranje faznih ravnoteža** realistične rane kore — hidratiziranog hadejskog metabazalta iz pojasa zelenih stijena Nuvvuagittuq — kako bi odredili na kojoj bi temperaturi i dubini takva stijena počela taliti.

Jedan metodološki izbor važan je za čitanje cijelog rada: autori su namjerno postavili pretpostavke *protiv* vlastitog zaključka. Pretpostavili su „nehondritski" plašt, s manje radioaktivnih elemenata koji proizvode toplinu od hondritskog referentnog modela, s manje od polovice njegova unutarnjeg zagrijavanja, koristili konzervativne stope zagrijavanja i zanemarili plimno zagrijavanje mladog, bliskog Mjeseca. Zato su njihove izračunate temperature kore **minimumi** — donje granice. Ako išta, stvarni Had bio je topliji od modela.

Što su pronašli

Udari, a ne unutarnja toplina, dominirali su energetskim proračunom Hada. Kada se toplina udara integrira kroz vrijeme, nadmašuje unutarnji doprinos — najmanje za red veličine kroz veći dio Hada. U toj slici zagrijavanje udarima, a ne radioaktivni raspad, glavni je pokretač rane tektonike i postaje sporedno tek nakon otprilike **3.9 Ga**.

Ta je toplina održavala koru tankom i plitko rastaljenom. Bez udara i advekcije taline model daje hadejsku koru koja je djelomično rastaljena tek ispod oko 10–15 km. Dodavanjem topline udara zona taljenja dramatično se podiže: kora postaje djelomično rastaljena već **nekoliko kilometara ispod površine**, otprilike ispod 2–5 km. Na oko 5 km dubine modeli predviđaju više od 30% taline — stanje u kojem je stijena preslaba da bi se držala kao kruta ploča. Na 5–10 km, temperature od ~1000–1100°C znače da je kora opsežno rastaljena gotovo neovisno o sastavu. Preživjela čvrsta kora bila bi **tanka,**

manja od oko 5 km.

Napola rastaljena kora briše samu sebe. Opsežno taljenje omogućuje gustom, željezom i magnezijem bogatom materijalu da tone i odvaja se, dok lakše, silicijem bogate taline rastu prema gore. S vremenom to prosječan sastav kore pomiče prema razvijenijim, silicijem bogatim sastavima — i proizvodi felsičnu talinu iz koje se može kristalizirati cirkon. Gotovo sva ta tanka kora zatim bi se reciklirala natrag u konvektirajući plašt, što je usklađeno s kemijskim, izotopnim zapisom. U ovom modelu gotovo potpuna odsutnost hadejskih stijena nije rupa u zapisu — nego *predviđanje*. Stijene od 4.2 Ga i cirkoni od 4.4 Ga rijetki su preživjeli ostaci kore koja se uglavnom uništavala gotovo jednako brzo kao što je nastajala.

Kraj bombardiranja vremenski se poklapa s prvim trajnim kontinentima. Kako je bombardiranje slabilo kroz prijelaz 4.0–3.9 Ga, kora je napokon mogla zadebljati i opstati. Najstarije preživjele kontinentalne stijene pojavljuju se oko istog prijelaza. Autori to formuliraju oprezno: da se trajna kontinentalna kora pojavila upravo tada „vjerojatno nije slučajnost".

Njihov glavni zaključak: u tim uvjetima — s tankom korom rastaljenom već nekoliko kilometara ispod površine — **tektonika ploča u Hadu nije vjerojatna**.

Pokazuju i zašto su raniji radovi dolazili do suprotnog zaključka. Prethodne studije stohastičkih udara nalazile su samo mali učinak, s manje od 2.5% kore rastaljene u bilo kojem trenutku. Te studije izostavile su dvije stvari koje ova uključuje: globalni učinak velikih udara na taljenje duboko u plaštu i prijenos te topline prema gore uzlaznom magmom. Kada se to vrati u model, toplinska se slika drastično mijenja.

Zašto model nije sjećanje

Sve gore navedeno izlaz je simulacija, a ne očitanje hadejskih stijena — jer tih stijena gotovo više nema. To rezultat ne čini slabim, ali određuje o kakvoj vrsti rezultata je riječ.

Lanac glasi: *model* toka udara hrani *model* protoka topline kroz plašt i koru, provjeren prema *modelu* taljenja određene stijene. Svaka je karika fizikalno motivirana i, gdje je moguće, validirana — ali cjelina je koherentan argument o tome kako je Had *morao* izgledati prema razumno pretpostavljenoj fizici, a ne mjerenje kako je *doista* izgledao.

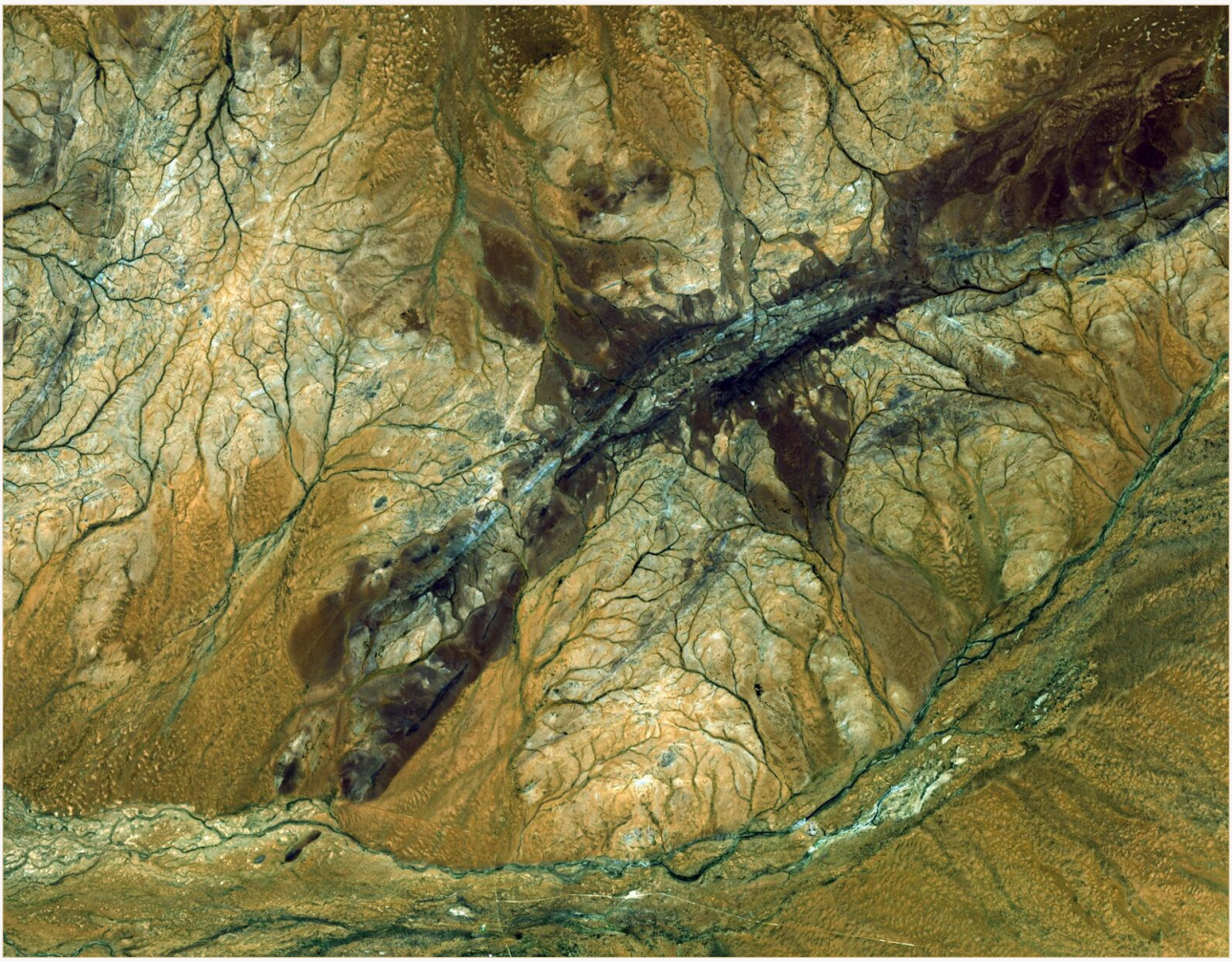
Zato su konzervativne pretpostavke autora važnije nego što se čini. Budući da su odabrali donju granicu zagrijavanja i ipak dobili plitku koru koja je opsežno rastaljena, kvalitativni zaključak — hadejska kora bila je vruća i slaba — robustan je na njihove izbore. Ono što *nije* čvrsto određeno jesu precizne brojke: točni geotermalni profili, točni udjeli taline i točna debljina kore. Smjer rezultata čitajte kao snažan, decimalna mjesta kao privremena.

Što ovo *ne* dokazuje

- **Ne** promatra izravno hadejsku koru. Iz tog razdoblja gotovo da nema stijena; ovo je rezultat modeliranja onoga što fizika implicira, ne mjerenje.
- **Ne** oslanja se na „Late Heavy Bombardment". Korišteni tok udara opada i stohastičan je — model ne treba niti koristi nagli vrhunac bombardiranja.
- **Ne** zatvara raspravu o tektonici ploča. „Malo vjerojatna" ovdje je snažna fizikalno utemeljena inferencija u korist vruće rane Zemlje sa stagnantnim ili „mekanim" pokrovom, ali tektonski režim Hada i dalje je stvarno sporan.
- **Ne** dokazuje da su udari *uzrokovali* pojavu kontinenata oko prijelaza 4.0–3.9 Ga. Vremensko poklapanje snažna je povezanost koju sami autori nazivaju „vjerojatno ne slučajno" — to je pažljiv jezik za uvjerljivu korelaciju, ne dokazan uzrok.
- Cirkoni iz Jack Hillsa **nisu** sačuvani kontinenti. To su rijetka preživjela zrna koja pokazuju da su felsični materijal i voda postojali rano; cijela poanta modela jest da je kora koja ih je proizvela uglavnom reciklirana.
- **Ne** rekonstruira cjelovitu povijest rane Zemlje. Simulacije su idealizirane — jednodimenzionalni profili i dvodimenzionalni ekvatorski presjeci s udarima ograničenima blizu ekvatora, prikazani kao vremenski presjeci — a ne potpun četverodimenzionalni model planeta.

Koliko su dokazi jaki?

Za središnju tvrdnju — da je zagrijavanje udarima bilo faktor prvog reda za hadejsku koru i držalo je tankom i plitko rastaljenom — argument je koherentan i, u važnom smislu, konzervativan. Koristi provjeren geodinamički kod, fizikalno razumne ulaze i pretpostavke donje granice te uključuje izvor topline koji je većina prethodnih modela jednostavno zanemarivala. Dodatno dobiva na uvjerljivosti jer istom idejom objašnjava dvije tvrdokorne činjenice: zašto gotovo nijedna stijena starija od ~4 Ga nije preživjela, i zašto se trajna kora pojavljuje upravo kada bombardiranje slabi.



Jack Hills u Zapadnoj Australiji na snimci NASA-inog instrumenta ASTER. Cirkoni iz ovog područja među najstarijim su poznatim preživjelim materijalom rane Zemljine kore — sitni tragovi iz eona čije su stijene uglavnom izbrisane.

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

Ograničenja su jednako jasna i tipična za svaki model duboke prošlosti: modeli su složeni na modele, oslonjeni na vrlo oskudan stijenski zapis, a najistaknutiji zaključak — „tektonika ploča nije vjerojatna" — inferencija je, ne opažanje. Ispravan stav je tretirati ovo kao snažnu, dobro obrazloženu hipotezu koja preoblikuje sliku Hada i sada poziva druge da testiraju njezine pretpostavke — osobito izbor modela toka udara — a ne kao zatvoren slučaj.

Najkorisniji sažetak nije ni „ovako je Had izgledao" ni „to je samo simulacija". On glasi: prema razumno pretpostavljenoj, konzervativnoj fizici, rana Zemlja pod snažnim bombardiranjem imala bi tanku, napola rastaljenu koru koja se sama reciklira — i ta jedna ideja objašnjava iznenađujuće mnogo od onoga malo što stvarno možemo vidjeti.

Zašto je to važno

Popularna slika rane Zemlje često oscilira između dviju krajnosti: mirnog vodenog svijeta s tektonikom ploča gotovo poput današnje Zemlje ili paklenog planeta lave. Ovaj rad skicira konkretan, fizikalno motiviran srednji slučaj: koru koja je bila tanka i iznova se pretapala već nekoliko kilometara ispod površine, stalno uništavana i ponovno stvarana, pri čemu su udari — ne unutarnja toplina — određivali uvjete.

To preoblikovanje stvarno nešto objašnjava. Nudi jedan mehanizam za dvije najveće činjenice o Zemljinu djetinjstvu — gotovo potpuno odsustvo stijenskog zapisa i vrijeme pojave prvih trajnih kontinenata — i u središte priče stavlja često zanemaren proces, zagrijavanje udarima. Ako izdrži provjeru, mijenja način na koji razmišljamo o tome kada je Zemlja uopće postala planet stabilnih kontinenata, a može se primijeniti i na druge stjenovite svjetove koji su nastajali pod vlastitim bombardiranjem.

Ništa od toga ne zahtijeva da model bude posljednja riječ. Dovoljno je da bude dovoljno dobra hipoteza za testiranje — a vezivanjem uz preživjeli zapis cirkona i izotopa to jest. „Skriveni Had” iz naslova upravo je poanta: doba do kojeg uglavnom možemo doprijeti samo modeliranjem, jer je samo izbrisalo vlastite dokaze.

Sažetak bez ukrasa

Prvi Zemljin eon, Had (prije ~4.03 Ga), ostavio je gotovo nikakav stijenski zapis. Ova studija modeliranjem pita kakva bi kora bila kada se uključi izvor topline koji se obično izostavlja: udari. Koristeći stohastički model opadajućeg toka udara zajedno s provjerenim 1D i 2D simulacijama protoka topline kroz koru i plašt, uključujući toplinu koju nosi uzlazna talina, autori nalaze da bi vremenski integrirana toplina udara veći dio Hada nadmašivala svu Zemljinu unutarnju toplinu za najmanje red veličine. Posljedica je tanka kora (ispod ~5 km), djelomično rastaljena već nekoliko kilometara ispod površine i na ~5 km dubine rastaljena više od 30% — preslaba za tektoniku ploča, koju autori za Had smatraju malo vjerojatnom. Takva bi se kora uglavnom reciklirala u plašt, što bi objasnilo zašto je tako malo hadejskog materijala preživjelo; kako su udari slabili kroz prijelaz 4.0–3.9 Ga, trajna kontinentalna kora mogla je opstati, otprilike kada se pojavljuju najstarije preživjele felsične stijene — „vjerojatno nije slučajnost”. Budući da su autori namjerno koristili konzervativno zagrijavanje donje granice, kvalitativni rezultat robustan je iako precizne brojke nisu fiksne. To je snažan, koherentan model Zemljina djetinjstva — ne izravno opažanje.

Provjera bez uljepšavanja

Što rad pokazuje: U fizikalno utemeljenim simulacijama koje uključuju zagrijavanje udarima i magmatski prijenos topline hadejska kora izlazi tanka i djelomično rastaljena već nekoliko kilometara ispod površine, s dominacijom topline udara nad unutarnjom toplinom, uglavnom reciklirana natrag

u plašt i — prema ovom modelu — nesposobna podržavati tektoniku ploča.

Što je vjerojatno, ali nije dokazano: Da su udari razlog pojave trajnih kontinenata oko 3.9 Ga; da je Had bio svijet stagnantnog ili mekog pokrova umjesto rane tektonike ploča; da gotovo nijedna hadejska stijena nije preživjela upravo zato što se rastaljena kora reciklirala.

Što ne pokazuje: Izravno mjerenje hadejske kore; konačan odgovor na raspravu o tektonici ploča; dokazan uzročni odnos između slabljenja bombardiranja i prvih kontinenata; da cirkoni Jack Hillsa predstavljaju očuvane kontinente; potpuni model ranog planeta.

Glavna ograničenja: Hadejski stijenski zapis gotovo ne postoji, pa je rezultat model ograničen vrlo malom količinom podataka; slaže modele na modele (tok udara → geodinamika → fazne ravnoteže); sam tok udara reprezentativan je, ali neizvjestan izbor; simulacije su idealizirane (1D i 2D ekvatorski presjeci, vremenski snimci). Konzervativne pretpostavke donje granice jačaju kvalitativni zaključak, ali ne čine specifične geoterme preciznima.

Koliko povjerenja treba imati opći čitatelj? Visoko da bi prema razumno pretpostavljenoj fizici snažno bombardirana rana Zemlja imala vruću, tanku i plitko rastaljenu koru. Umjereno da to čini hadejsku tektoniku ploča malo vjerojatnom i objašnjava nedostajući stijenski zapis. Nisko za bilo kakvu tvrdnju da ovo *dokazuje* kako su kontinenti nastali ili točno kada — ovo je snažan, konzervativan model koji preoblikuje Had, ne izravan pogled na njega.

Izvori

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