



The CLEAN PAPER

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

Tenká, zpola roztavená prvotní kůra: model, v němž hadaikum ovládaly dopady, nikoli vnitřní teplo

První eon Země, hadaikum, nezanechal téměř žádný horninový záznam. Tato modelová studie se ptá, jak by kůra vypadala, kdybychom nepřehlíželi dopady těles. Pomocí stochastického modelu slábnoucího toku dopadů a ověřených simulací přenosu tepla v kůře a plášti autoři zjistili, že po většinu hadaika by teplo z dopadů převyšovalo veškeré vnitřní teplo Země nejméně o řád. Zanechalo by tenkou kůru (méně než ~5 km), částečně roztavenou už několik kilometrů pod povrchem — podle autorů příliš slabou pro deskovou tektoniku a náchylnou k recyklaci zpět do pláště, což by vysvětlovalo, proč se zachovalo tak málo hadaického materiálu. Když po ~3,9 Ga (asi před 3,9 miliardy let) dopadů ubylo, mohla vzniknout trvalá kontinentální kůra právě v době, kdy se objevují nejstarší dochované felzické horniny — podle opatrných slov autorů „pravděpodobně ne náhodou“. Protože záměrně použili konzervativní dolní mez ohřevu, kvalitativní výsledek je robustní, i když přesná čísla nejsou pevně určena. Je to silný, ucelený model raného dětství Země — ne jeho přímé pozorování.

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](https://doi.org/10.1126/science.aeb5402)

Kapitola příběhu Země, která téměř nemá žádné stránky

Země je jediná známá planeta s kontinenty — vztakovými pevninami bohatými na křemík, na nichž všichni žijeme. Přesto je způsob, jakým kontinenty vznikly, jedním z nejstarších nevyřešených problémů v geologii, a to z krutého důvodu: důkazy jsou téměř zcela pryč.

První eon Země, hadaikum, trval od vzniku planety přibližně do doby před 4,03 miliardy let (Ga). Z těchto prvních půl miliardy let se téměř nic nedochovalo. Nejstarší neporušené felzické (kontinentální) horniny jsou staré přibližně 4,03 miliardy let. Několik vzácných bazaltových hornin dosahuje věku ~4,2 Ga. Nejstarším materiálem jakéhokoli druhu je rozptýl zirkonových krystalů — nejznáměji z Jack Hills v Západní Austrálii — datovaný do 4,4 miliardy let. To je celý archiv počátků Země: několik lokalit a některé minerály velikosti zrněk písku.

Tato studie do archivu nepřidává žádnou novou horninu. Dělá něco jiného: vytváří fyzikální model toho, jak by za daných podmínek vypadala hadaická kůra, a klade otázku, kterou většina raných modelů Země vynechává. Co se stane, když přestanete ignorovat fakt, že raná Země byla bombardována?

Odpověď autorů je pozoruhodná. Po většinu hadaika by teplo dodané dopady převážilo nad veškerým vnitřním teplem Země a zanechalo tenkou, zcela roztavenou kůru — podle autorů příliš slabou pro cokoli podobného dnešní deskové tektonice. Je to model, ne vzpomínka. Tentokrát však model bere vážně násilné podmínky období, které popisuje.

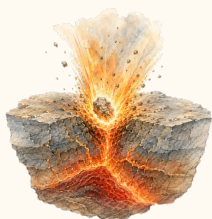
Model hadaika, ne jeho vzpomínka

Logika je teplejší: dopady zahřívají, kůra taje a záznam se sám maže.

Energie

Převládá teplo z dopadů

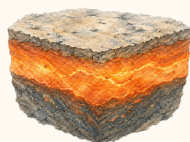
Po většinu hadaika nejméně o řád více než vnitřní teplo.



Důsledky

Tenká, mělce natavená kůra

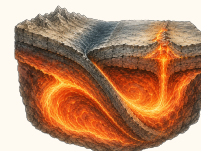
Kůra <5 km; >30 % taveniny v hloubce kolem 5 km.



Záznam

Většina kůry se recykluje

Vzácní přeživší: zirkony a nejstarší horniny.



Kolem přechodu 4,0–3,9 Ga se objevuje trvalá kůra.

V energetické bilanci modelu převládá teplo z dopadů; tenká, mělce natavená kůra se recykluje a trvalá kontinentální kůra se objevuje až kolem přechodu 4,0–3,9 Ga. Jde o model hadaika, ne jeho přímou vzpomínku.

Co autoři udělali

Tým spojil tři ingredience, které se obvykle drží odděleně.

Nejprve **stochastický model toku dopadů** — deště planetek a větších těles ve vnitřní Sluneční soustavě během hadaika a raného archaika. Podstatné je, že nejde o starší představu jediného výkyvu „pozdního velkého bombardování“. Tok je zpočátku intenzivní a **postupně slábne**, zatímco velké dopady přicházejí náhodně (stochasticky), ne podle rozvrhu. Model byl přeskálován ze statistik kráterování Měsíce a vnitřní Sluneční soustavy a zvolen tak, aby odpovídal rozdělení stáří zirkonů a dostupným paleomagnetickým dokladům.

Za druhé, **geodynamické simulace** toho, jak teplo prochází kůrou a horní vrstvou pláště. Použili ověřený mřížkový Boltzmannův kód (Planet_LB), který spouštěl jednoduché 1D výpočty teploty vůči hloubce a plnohodnotné 2D konvekční snímky pláště při 4,1 Ga. Patří sem běžné vnitřní zdroje tepla — radioaktivní rozpad a teplo z jádra — a co je důležité, **magmatická advekce**: teplo přenášené vzhůru stoupající taveninou, kterou většina tepelných modelů kůry opomíjí.

Za třetí, **fázově rovnovážné modelování** realistické rané kůry — hydratovaného hadaického metabazaltu z pásma zelených břidlic Nuvvuagittuq — aby se zjistilo, při jaké teplotě a hloubce by taková hornina začala tát.

Jedna metodická volba je důležitá pro čtení celé práce: autoři záměrně nastavili podmínky *proti* vlastnímu závěru. Předpokládali „nechondritický“ plášť (s menším množstvím radioaktivního materiálu produkujícího teplo než v chondritickém referenčním modelu), jehož vnitřní ohřev dosahoval méně než poloviny standardního modelu. Použili konzervativní odhad ohřevu a pominuli slapové zahřívání mladým, blízkým Měsícem. Vypočtené teploty kůry jsou proto **minimem** — dolní mezí. Skutečné hadaikum bylo pravděpodobně teplejší než model.

Co našli

Energetické bilanci hadaika dominovaly dopady, nikoli vnitřní teplo. Po integraci v čase převyšuje teplo z dopadů vnitřní příspěvek — po velkou část hadaika nejméně o řád. Hlavním motorem raného tektonismu je v tomto obraze ohřev dopady, ne radioaktivní rozpad; po zhruba **3,9 Ga** jeho význam klesá.

Toto teplo udržovalo kůru tenkou a mělce roztavenou. Bez dopadů a tavení jejich model vytváří hadaickou kůru, která je částečně roztavená až pod hloubkou asi 10–15 km. Přidáním tepla z dopadů se zóna tání dramaticky posune vzhůru: kůra je částečně roztavená už **několik kilometrů pod povrchem** (přibližně v hloubce 2–5 km). V hloubce kolem 5 km modely předpovídají více než 30 % taveniny — stav, kdy je hornina příliš slabá na to, aby držela pohromadě jako pevná deska. Při 5–10 km teplotách ~1000–1100 °C je kůra výrazně roztavená téměř bez ohledu na její složení. Přezívající pevná kůra by byla **tenká, pod asi 5 km**.

Poloroztavená kůra se sama vymaže. Rozsáhlé tání umožňuje hustému, železom a hořčíku bohatému materiálu klesat a oddělovat se, zatímco lehčí, křemičité taveniny stoupají. Postupem

času to posouvá průměrnou kůru k vyvinutějším, křemíku bohatým složením — a vytváří takový typ felzického tavení, které dokáže krystalizovat zirkon. Téměř celá tato tenká kůra by pak byla recyklována zpět do konvekčního pláště, což odpovídá chemickému (izotopickému) záznamu. V tomto modelu téměř úplná absence hadaických hornin není mezerou v záznamu — je to *předpověď*. Horniny staré 4,2 Ga a zirkony staré 4,4 Ga jsou vzácnými pozůstatky kůry, která byla většinou zničena tak rychle, jak vznikla.

Konec bombardování se shoduje s prvními trvalými kontinenty. Jak bombardování sláblo během přechodu 4,0–3,9 Ga, kůra mohla konečně ztlustnout a vydržet. Nejstarší dochované kontinentální horniny se objevují právě kolem tohoto přechodu. Autoři to pečlivě formulovali: že se v této době objevila trvalá kontinentální kůra, “pravděpodobně není náhoda.”

Jejich hlavní závěr: za těchto podmínek — tenká kůra, roztavená několik kilometrů pod povrchem — **Hadaická desková tektonika je nepravděpodobná.**

Také ukazují, proč dřívější práce dospěly k opačnému závěru. Předchozí studie stochastických dopadů zjistily pouze malý efekt, kdy bylo v jakémkoli okamžiku roztaveno méně než 2,5 % kůry. Tyto studie vynechaly dvě věci, které tato zahrnuje: globální dopad velkých dopadů na tání hluboko v plášti a vzhůru přenos tohoto tepla stoupající magmatem. Když je vrátíte zpět, teplotní obraz se výrazně změní.

Proč model není paměť

Vše výše je výstup simulací, nikoli odečtení z hadaických hornin — protože tyto horniny téměř vůbec neexistují. To sice neznamená, že výsledek je slabý, ale určuje, jaký výsledek to je.

Řetězec vypadá takto: *model* toku dopadů vstupuje do *modelu* přenosu tepla v plášti a kůře, ověřeného pomocí *modelu* tavení konkrétní horniny. Každý krok je fyzikálně odůvodněn a tam, kde je to možné, srovnán s referencí. Celek je však uceleným argumentem o tom, jak hadaikum podle věrohodné fyziky muselo *vypadat*, ne měřením toho, jak *vypadalo*.

Proto jsou konzervativní předpoklady autorů důležitější než se zdají. Protože zvolili ohřev s dolní hranicí a přesto měli všudypřítomně roztavenou mělkou kůru, kvalitativní závěr — hadaická kůra byla horká a slabá — je robustní vůči jejich volbě. Co však *není* přesně vymezeno, je přesné číslo: přesný geoterm, přesné frakce taveniny, přesná tloušťka kůry. Směr výsledku čtete jako silný a desetinná místa jako provizorní.

Co to nedokazuje*

- Hadaickou kůru přímo nepozoruje. Z této doby téměř žádné horniny neexistují; jde o modelový výsledek vyplývající z fyziky, nikoli o měření.
- **Nestojí** na „pozdním velkém bombardování“. Použitý tok dopadů je klesající, stochastický — model nepotřebuje a nevyvolává náhlý nárůst bombardování.

- Debatu o deskové tektonice definitivně neuzavírá. “Nepravděpodobné” je zde silný, fyzicky ukotvený závěr upřednostňující horkou, stagnující nebo měkkou ranou Zemi — ale tektonický režim hadaika zůstává skutečně sporný.
- Nedokazuje, že by dopady *způsobily* vznik kontinentů kolem přechodu 4,0–3,9 Ga. Časová shoda je silná asociace, kterou autoři sami nazývají “pravděpodobně ne náhodou” — tedy pečlivý jazyk pro přesvědčivou korelaci, nikoli prokázanou příčinu.
- Zirkony z Jack Hills **nejsou** zachované kontinenty. Jsou to vzácně dochovaná zrna, která ukazují, že felzický materiál a voda existovaly už dříve; smyslem modelu je právě to, že kůra, z níž pocházela, byla z větší části recyklována.
- Nerekonstruuje úplnou historii rané Země. Simulace jsou idealizované — 1D profily a 2D rovníkové řezy s nárazy omezenými blízko rovníku, zachycené jako snímky — nikoli kompletní čtyřrozměrný model planety.

Jak silné jsou důkazy?

Pro své ústřední tvrzení — že ohřev dopady byl hlavním faktorem určujícím hadaickou kůru, která ji udržovala tenkou a mělce roztavenou — je argument koherentní a v důležitém smyslu konzervativní. Používá ověřený geodynamický kód, fyzikálně rozumné vstupy a předpoklady dolní meze, a integruje zdroj tepla, který většina předchozích modelů jednoduše ignorovala. Také získává důvěryhodnost tím, že vysvětluje dvě tvrdohlavé skutečnosti najednou: proč téměř žádná hornina starší než ~4 Ga nepřežila (téměř úplná recyklace) a proč se trvalá kůra objevuje právě ve chvíli, kdy bombardování odezní.



Jack Hills, Západní Austrálie, viděno přístrojem NASA ASTER. Zirkony z této oblasti zahrnují některé z nejstarších známých dochovaných materiálů z rané zemské kůry, drobné stopy z dávné doby, kdy byly horniny většinou vymazány.

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

Omezení jsou stejně zřetelná a společná všem modelům hlubokého času: jsou to modely postavené na modelech, ukotvené na velmi řídkém horninovém záznamu, a jeho nejcitovanější závěr — “desková tektonika je nepravděpodobná” — je spíše závěr než pozorování. Správný postoj je považovat to za silnou, dobře odůvodněnou hypotézu, která nově rámuje hadaikum a nyní vyzývá ostatní, aby otestovali její předpoklady — zejména volbu modelu toku dopadů — místo uzavřeného případu.

Nejužitečnější shrnutí nezní ani „takové bylo hadaikum“, ani „je to jen simulace“. Je to tak: vzhledem k věrohodné, konzervativní fyzice by raná Země pod těžkým bombardováním měla tenkou, poloroztavenou, samorecyklující kůru — a tato jediná myšlenka vysvětluje překvapivě velkou část toho mála, co skutečně vidíme.

Proč je to důležité

Populární obraz rané Země se pohybuje mezi dvěma extrémy: klidným, deskově tektonickým vodním světem téměř jako dnešní, nebo pekelnou lávovou planetou. Tato práce načrtává specifický, fyzicky motivovaný střed: kůru, která byla tenká a opakovaně tavená z několika kilometrů hloubky, neustále ničená a přetvářená, přičemž podmínky určovaly nárazy — nikoli vnitřní teplo.

Toto nové rámování skutečně funguje. Nabízí jediný mechanismus pro vysvětlení dvou nejvýraznějších skutečností o počátcích Země — téměř úplné absence horninového záznamu a načasování prvních trvalých kontinentů — a staví do středu příběhu obvykle opomíjený proces, ohřev dopady. Pokud to obstojí, změní to, jak uvažujeme o tom, kdy se Země vůbec stala planetou stabilních kontinentů, a přenáší se to i na další skalnaté světy, které vznikly během vlastních období bombardování.

Nic z toho nevyžaduje, aby model měl poslední slovo. Vyžaduje to, aby byla dostatečně dobrá hypotéza k testování — a tím, že se váže na dochovaný záznam o zirkonu a izotopech, to tak skutečně je. „Skryté hadaikum“ v názvu je přesně ten smysl: éra, ke které se můžeme dostat většinou jen modelováním, protože tato éra vymazala své vlastní důkazy.

Stručné shrnutí

První eon Země, hadaikum (do doby před ~4,03 Ga), nezanechal téměř žádný horninový záznam. Tato modelová studie se ptá, jak by kůra vypadala po zahrnutí zdroje tepla, který se obvykle opomíjí: dopadů. Pomocí stochastického, klesajícího modelu toku dopadů spolu s ověřenými 1D a 2D simulacemi toku tepla v kůře a plášti (včetně tepla přenášeného stoupajícím tavením) autoři zjistili, že časově integrované teplo z dopadů by překročilo celkové vnitřní teplo Země alespoň o řád po většinu hadaika. Důsledkem je tenká kůra (pod ~5 km), která je částečně roztavená jen několik kilometrů pod povrchem a v hloubce ~5 km je více než 30 % roztavená — příliš slabá na udržení deskové tektoniky, kterou autoři v hadaiku považují za nepravděpodobnou. Taková kůra by se většinou recyklovala zpět do pláště, což by vysvětlovalo, proč přežívá tak málo hadaického materiálu; jak dopady slábly během přechodu před 4,0–3,9 miliardy let, mohla by vzniknout trvalá kontinentální kůra, přibližně v době, kdy se objeví nejstarší dochované felzické horniny — „pravděpodobně ne náhodou“. Protože autoři záměrně použili konzervativní, dolní hranici ohřevu, je kvalitativní výsledek robustní, i když přesná čísla nejsou pevně stanovena. Je to silný, koherentní model počátků Země — nikoli přímé pozorování.

Kontrola bez příkras

Co práce ukazuje: Ve fyzikálně podložených simulacích, které zahrnují ohřev dopady a magmatický přenos tepla, vychází hadaická kůra tenká a částečně roztavená jen několik kilometrů pod povrchem, ovládaná teplem z dopadů namísto vnitřního tepla, většinou recyklovaná zpět do pláště a — na tomto modelu — není schopná unést deskovou tektoniku.

Co je pravděpodobné, ale není dokázané: Že dopady vysvětlují, proč se kolem 3,9 Ga objevila trvalá kontinentální kůra; že hadaikum byl stagnující nebo měkký svět, nikoli raný deskově tektonický svět; že téměř žádná hadaická hornina nepřežívá právě proto, že se roztavená kůra recyklovala sama.

Co neukazuje: Přímé měření hadaické kůry; rozhodnutou odpověď na debatu o deskové tektonice; prokázaná příčinná souvislost mezi slábnoucím bombardováním a prvními kontinenty; že zirkony z Jack Hills představují zachované kontinenty; kompletní model rané planety.

Hlavní omezení: horninový záznam z hadaika je téměř neexistující, takže výsledkem je model omezený velmi malým množstvím dat; skládá modely na modely (tok dopadů → geodynamika → fázové rovnováhy); samotný tok dopadů je reprezentativní, nejistá volba; simulace jsou idealizovány (1D a 2D rovníkové řezy, momentky v čase). Konzervativní, dolní meze předpokladů posilují kvalitativní závěr, ale nečiní konkrétní geotermy přesnými.

Jakou důvěru by měl mít běžný čtenář? Vysokou v to, že podle věrohodné fyziky by silně bombardovaná raná Země měla horkou, tenkou, mělce roztavenou kůru. Střední v to, že tím činí hadaickou deskovou tektoniku nepravděpodobnou a vysvětluje chybějící horninový záznam. Nízkou důvěru v jakékoli tvrzení, že to *dokazuje*, jak kontinenty vznikly nebo přesně kdy — jde o silný, konzervativní model, který přetváří hadaikum, nikoli přímý pohled na něj.

Zdroje

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