



The CLEAN PAPER

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

เปลือกโลกแรกทีบางและกึ่งหลอม: แบบจำลองที่การชน ไม่ใช่ความร้อนภายใน เป็นตัวขับเคลื่อน Hadean

บรมยุคแรกของโลก Hadean แทบไม่ทิ้งบันทึกดิน งานแบบจำลองนี้ถามว่าเปลือกจะเป็นอย่างไรเมื่อไม่ละเลยการชน ด้วยแบบจำลอง impact flux แบบ stochastic ที่ลดลงตามเวลาและ simulation การไหลความร้อนในเปลือกกับ mantle ที่ผ่าน benchmark ผู้เขียนพบว่าความร้อนจากการชนจะสูงกว่าความร้อนภายในโลกทั้งหมดอย่างน้อยหนึ่งลำดับขนาดตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ทั้งเปลือกบาง (ต่ำกว่า ~5 กม.) ที่หลอมบางส่วนเพียงไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น — อ่อนเกินไปสำหรับ plate tectonics ตามข้อเสนอของทิม และมีแนวโน้มไร้ขีดเคลกสับ mantle ซึ่งอธิบายว่าทำไมวัสดุ Hadean รอดน้อย เมื่อการชนลดลงหลัง ~3.9 Ga เปลือกทวีปที่คงทนจึงก่อตัวได้ ตรงกับเวลาที่หิน felsic รอดเก่าแก่ที่สุดปรากฏ — ‘น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ’ ตามคำระวังของผู้เขียน เนื่องจากจงใจใช้ heating แบบ lower bound ผลเชิงคุณภาพ robust แม้ตัวเลขละเอียดไม่ตรง นี่เป็นแบบจำลองวิทยาการของโลกที่แข็งแกร่ง ไม่ใช้การสังเกตโดยตรง

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

บทหนึ่งของเรื่องราวโลกที่แทบไม่มีหน้ากระดาษเหลืออยู่

โลกเป็นดาวเคราะห์เพียงดวงเดียวที่เราว่ามีทวีป — พื้นดินที่ลอยตัวได้และอุดมด้วยซิลิกาซึ่งเราอาศัยอยู่ แต่ทวีปแรกก่อตัวอย่างไรยังเป็นหนึ่งในปัญหาเก่าแก่ที่สุดที่ธรณีวิทยายังแก้ไม่ได้ ด้วยเหตุผลที่โหดร้าย: หลักฐานแทบทั้งหมดหายไปแล้ว

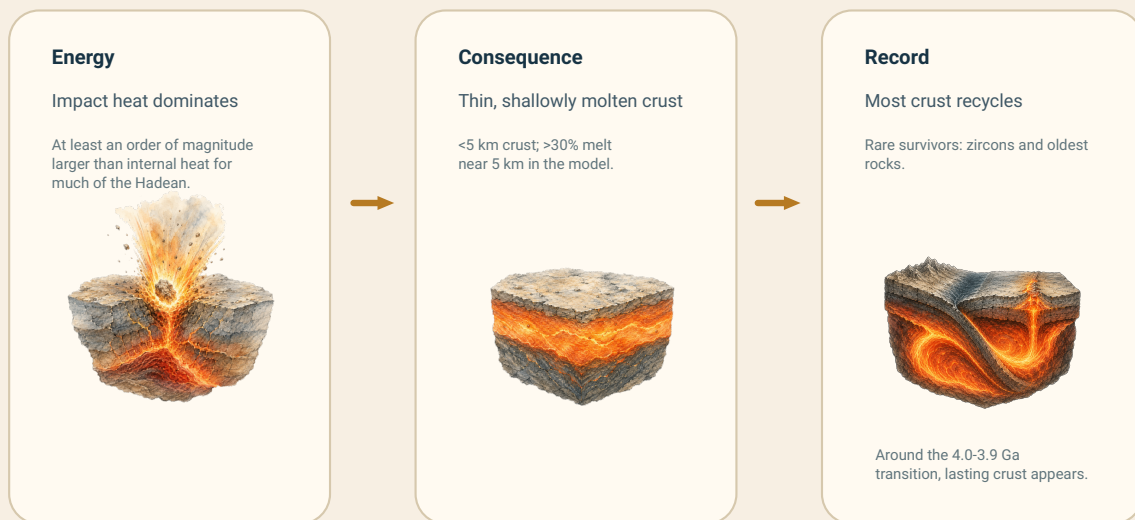
บรมยุคแรกของโลก Hadean เริ่มตั้งแต่โลกถือกำเนิดจนถึงประมาณ 4.03 พันล้านปีก่อน (Ga) จากช่วงครึ่งพันล้านปีแรกนั้นแทบไม่มีอะไรเหลือรอด หิน felsic (ชนิดเดียวกับเปลือกทวีป) ที่สมบูรณ์เก่าแก่ที่สุดมีอายุราว 4.03 Ga หิน basaltic หายากบางก้อนย้อนไปถึง ~4.2 Ga วัสดุที่เก่าแก่ที่สุดทุกชนิดคือผลึก zircon กระจุกกระจาย — ที่มีชื่อเสียงที่สุดมาจาก Jack Hills ในออสเตรเลียตะวันตก — อายุถึง 4.4 Ga นั่นคือจดหมายเหตุทั้งหมดจากวัยทารกของโลก: ตำแหน่งไม่กี่แห่งกับแร่ขนาดเม็ดทรายบางส่วน

งานนี้ไม่ได้เพิ่มหินก้อนใหม่เข้าไปในจดหมายเหตุนั้น แต่ทำอีกอย่าง: สร้างแบบจำลองทางกายภาพว่าเปลือกโลก Hadean จะมีหน้าตาอย่างไรภายใต้ฟิสิกส์นั้น แล้วถามคำถามที่แบบจำลองโลกยุคต้นส่วนใหญ่มองข้าม จะเกิดอะไรขึ้นถ้าเราเลิกละเลยข้อเท็จจริงว่าโลกยุคต้นกำลังถูกวัดถูกวาสกถล่มอยู่?

คำตอบที่ผู้เขียนได้โดดเด่นมาก ตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ความร้อนจากการชนจะท่วมความร้อนภายในโลกทั้งหมด ทำให้เปลือกบางและกึ่งหลอมเหลว — อ่อนเกินไปสำหรับสิ่งที่คล้าย plate tectonics แบบสมัยใหม่ตามข้อเสนอของทิม มันเป็นแบบจำลอง ไม่ใช่ความทรงจำ แต่เป็นแบบจำลองที่อย่างน้อยพยายามนับความรุนแรงของยุคที่มันกำลังอธิบายเข้าไปด้วย

A model of the Hadean, not a memory of it

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



ความร้อนจากการชนครองงบประมาณพลังงานของแบบจำลอง เปลือกบางที่หลอมเหลวตื้น ๆ หมุนเวียนกลับตัวเอง และเปลือกทวีปที่คงทนปรากฏเพียงราวช่วงเปลี่ยนผ่าน 4.0–3.9 Ga นี่เป็นแบบจำลองของ Hadean ไม่ใช่ความทรงจำโดยตรงจากยุคนั้น

ผู้วิจัยทำอะไร

ทีมรวมองค์ประกอบสามอย่างที่ปกติมักแยกจากกัน

อย่างแรก **แบบจำลอง stochastic ของ impact flux** — ฝนดาวเคราะห์น้อยและวัตถุใหญ่กว่าที่ชนระบบสุริยะชั้นในตลอด Hadean และ Archean ยุคต้น จุดสำคัญคือไม่ใช่แนวคิดเก่าที่มี “Late Heavy Bombardment” พุ่งขึ้นครั้งเดียว แต่เป็น flux ที่รุนแรงมากในช่วงต้นแล้ว **ลดลงตามเวลา** โดยการชนใหญ่เกิดแบบสุ่ม (stochastic) ไม่ได้มาตามตาราง แบบจำลองปรับสเกลจากสถิติการชนของดวงจันทร์และระบบสุริยะชั้นใน และเลือกให้สอดคล้องกับสเปกตรัมอายุ zircon กับหลักฐาน paleomagnetic ที่มี

อย่างที่สอง **การจำลอง geodynamics** ว่าความร้อนเคลื่อนผ่านเปลือกและ mantle ขึ้นบนอย่างไร ทีมใช้โค้ด lattice-Boltzmann ที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน (Planet_LB) ทั้งการคำนวณอุณหภูมิเทียบความลึกแบบ 1D อย่างง่าย และ snapshot convection แบบ 2D เต็มของ mantle ที่ 4.1 Ga การจำลองรวมแหล่งความร้อนภายในตามปกติ — การสลายกัมมันตรังสีและความร้อนจากแก่นโลก — และที่สำคัญคือ **magmatic advection**: ความร้อนที่ magma หลอมเหลวซึ่งลอยขึ้นพาขึ้นมา ซึ่งแบบจำลองความร้อนของเปลือกส่วนใหญ่มักจะไว้

อย่างที่สอง **แบบจำลอง phase equilibrium** ของเปลือกโลกยุคต้นที่สมจริง — Hadean metabasalt ที่มีน้ำจาก Nuvvuagittuq greenstone belt — เพื่อหาว่าหินแบบนี้เริ่มหลอมที่อุณหภูมิและความลึกเท่าไร

ตัวเลือกด้านวิธีวิทยาหนึ่งสำคัญต่อการอ่านทั้งงาน: ผู้เขียนจงใจวางสมมติฐานให้ *ตัว* ข้อสรุปของตนเอง พวกเขาสมมติ mantle แบบ “nonchondritic” (มีธาตุกัมมันตรังสีสร้างความร้อนน้อยกว่าค่าอ้างอิง chondritic) ซึ่งมีความร้อนภายในน้อยกว่าครึ่งของแบบจำลองมาตรฐาน ใช้อัตราความร้อนแบบอนุรักษ์นิยม และไม่รวม tidal heating จากดวงจันทร์วัยเยาว์ที่อยู่ใกล้โลก นั่นหมายความว่าอุณหภูมิเปลือกที่คำนวณได้เป็น **ค่าต่ำสุด** — lower bounds หากจะมีอดีต โลก Hadean จริงน่าจะร้อนกว่าที่แบบจำลองให้

พบอะไร

การชน ไม่ใช่ความร้อนภายใน **ครองงบประมาณ Hadean** เมื่อนำความร้อนจากการชนมารวมตามเวลา มันใหญ่กว่าส่วนจากภายในอย่างมาก — อย่างน้อยหนึ่งลำดับขนาดตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ในภาพนี้ impact heating ไม่ใช่การสลายกัมมันตรังสี เป็นเครื่องยนต์หลักของ tectonism ระยะแรก และบทบาทนี้เฟื่องพลเล็กน้อยหลังประมาณ 3.9 Ga

ความร้อนนั้นทำให้เปลือกบางและหลอมเหลว หากไม่มีการชนและ melt advection แบบจำลองให้เปลือก Hadean เริ่มหลอมบางส่วนเฉพาะลึกกว่า 10–15 กม. เมื่อเติมความร้อนจากการชน เซตหลอมยกขึ้นอย่างมาก: เปลือกเริ่มหลอมบางส่วนเพียง **ไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น** (ประมาณต่ำกว่า 2–5 กม.) ที่ความลึกราว 5 กม. แบบจำลองคาดว่ามี melt มากกว่า 30% — สภาพที่หินอ่อนเกินกว่าจะคงตัวเป็นแผ่นแข็ง ที่ 5–10 กม. อุณหภูมิ ~1000–1100°C หมายความว่าเปลือกหลอมมากแทบไม่ขึ้นกับองค์ประกอบ เปลือกแข็งที่เหลืออยู่จะ **บาง ต่ำกว่าประมาณ 5 กม.**

เปลือกก็หลอมลบลตัวเองออกจากบันทึก การหลอมมากทำให้วัสดุหนาแน่นที่อุดมเหล็กและแมกนีเซียมจมลงและแยกออก ขณะที่ melt เบากว่าและอุดมซิลิกาลอยขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป เปลือกโดยเฉลี่ยพัฒนาไปสู่องค์ประกอบที่อุดมซิลิกามากขึ้น — และสร้าง felsic melt ชนิดที่ตกผลึก zircon ได้ เปลือกบางเกือบทั้งหมดจะถูกรีไซเคิลกลับลง mantle ที่ convect อยู่ ซึ่งสอดคล้องกับบันทึกเคมี (isotope) ในแบบจำลองนี้ การแทบไม่พบหิน Hadean ไม่ใช่ช่องว่างในหลักฐาน — แต่มันเป็น *คำทำนาย* หินอายุ 4.2 Ga และ zircon 4.4 Ga คือผู้รอดหายากจากเปลือกที่ถูกทำลายเกือบเร็วเท่าที่มันก่อตัว

ปลายยุคการถล่มตรงกับทวีปที่อยู่รอดชุดแรก เมื่อ bombardment ลดลงผ่านช่วง 4.0–3.9 Ga เปลือกจึงสามารถหนาขึ้นและคงอยู่ หินทวีปเก่าแก่ที่สุดที่รอดอยู่ปรากฏราวช่วงเปลี่ยนผ่านเดียวกัน ผู้เขียนใช้ถ้อยคำระงวังกว้างว่า การที่เปลือกทวีปคงทน

ปรากฏช่วงนี้ “น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ”

ข้ออนุมานพาดหัวของพวกเขา คือ ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ — เปลือกบางและหลอมเหลวไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น — **plate tectonics ใน Hadean ไม่น่าเป็นไปได้**

พวกเขายังแสดงว่าทำไมงานก่อนหน้านี้ได้ข้อสรุปตรงข้าม งานก่อนที่ศึกษาการชนแบบ stochastic พบผลเพียงเล็กน้อย โดยเปลือกหลอมไม่ถึง 2.5% ณ เวลาใด ๆ งานเหล่านั้นละสองสิ่งทำงานนี้รวม: ผลทั่วโลกของการชนขนาดใหญ่ต่อการหลอมลึกใน mantle และการพาความร้อนนั้นขึ้นบนด้วย magma ที่ลอยขึ้น เมื่อใส่สองอย่างกลับเข้าไป ภาพความร้อนเปลี่ยนอย่างมาก

ทำไมแบบจำลองไม่ใช่ความทรงจำ

ทุกอย่างข้างต้นเป็นผลจาก การจำลอง ไม่ใช่ค่าที่อ่านจากหิน Hadean — เพราะหินเหล่านั้นแทบไม่เหลืออยู่ นี่ไม่ได้ทำให้ผลอ่อน แต่กำหนดว่าผลชนิดไหน

ห่วงโซ่คือ: แบบจำลอง impact flux ป้อน แบบจำลอง การไหลของความร้อนใน mantle และเปลือก ซึ่งตรวจเทียบกับ แบบจำลอง ว่าหินเฉพาะชนิดหลอมอย่างไร แต่ละสิ่งก็มีแรงจูงใจทางฟิสิกส์และชุดทดสอบมาตรฐาน เท่าที่ทำได้ — แต่ทั้งก่อนคือข้อโต้แย้งที่สอดคล้องกันว่า Hadean *ควรต้อง* มีสภาพอย่างไรภายใต้ฟิสิกส์ที่สมเหตุผล ไม่ใช่การวัดว่า จริง ๆ มันเป็นอย่างไร

นี่คือเหตุผลที่สมมติฐานอนุรักษนิยมของผู้เขียนสำคัญกว่าที่ดู เพราะพวกเขาเลือก heating เป็น lower bound แล้วก็ยังได้เลือก ดินที่หลอมอย่างกว้างขวาง ข้อสรุปเชิงคุณภาพ — เปลือก Hadean ร้อนและอ่อน — จึง robust ต่อการเลือก แต่สิ่งทำงาน *ไม่ได้* ตรงคือเลขละเอียด: geotherm ที่แน่นอน melt fraction ที่แน่นอน ความหนาเปลือกที่แน่นอน ให้เชื่อกิตติทางของผลอย่างมาก และมองทศนิยมว่า provisional

สิ่งที่ผลนี้ ยังพิสูจน์ไม่ได้

- **ไม่ได้** สังเกตเปลือก Hadean โดยตรง หินจากยุคนี้แทบไม่มี นี่คือผลแบบจำลองว่าฟิสิกส์บอกอะไร ไม่ใช่ค่าที่วัด
- **ไม่ได้** ฟัง “Late Heavy Bombardment” impact flux ที่ใช้ลดลงและ stochastic — แบบจำลองไม่ต้องการและไม่ได้เรียกใช้ spike การถล่มนับพัน
- **ไม่ได้** ปิดข้อถกเถียง plate tectonics คำว่า “ไม่น่าเป็นไปได้” ตรงนี้เป็นข้ออนุมานทางฟิสิกส์ที่แข็งแรง สนับสนุนโลกยุคต้นแบบ stagnant-lid หรือ squishy-lid ที่ร้อน — แต่โหมด tectonic ใน Hadean ยังถกเถียงจริง
- **ไม่ได้** พิสูจน์ว่าการชน *ทำให้* ทวีปปรากฏราว 4.0–3.9 Ga การตรงกันของเวลาเป็นความสัมพันธ์ที่แข็งแรงซึ่งผู้เขียนเองเรียกว่า “น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ” — เป็นภาษาระดับรองสำหรับ correlation ที่น่าสนใจ ไม่ใช่เหตุที่พิสูจน์แล้ว
- Zircon จาก Jack Hills **ไม่ใช่** ทวีปที่ถูกเก็บรักษา มันเป็นเม็ดแร่รอดหายากที่แสดงว่ามีวัสดุ felsic และน้ำตั้งแต่ต้น; แก่นของแบบจำลองคือเปลือกที่สร้างมันถูกริไซเคิลไปเกือบหมด
- **ไม่ได้** สร้างประวัติโลกยุคต้นทั้งหมด การจำลองเป็น idealized — profile 1D และ slice เส้นศูนย์สูตร 2D โดย impact จำกัดใกล้เส้นศูนย์สูตร เก็บเป็น snapshot — ไม่ใช่แบบจำลองสมมติเต็มของดาวเคราะห์

หลักฐานแข็งแรงแค่ไหน?

สำหรับข้ออ้างกลาง — impact heating เป็นตัวควบคุมอันดับแรกของเปลือก Hadean ทำให้มันบางและหลอมดิน — ข้อโต้แย้งสอดคล้องและในแง่สำคัญเป็นแบบอนุรักษ์นิยม ใช้โค้ด geodynamics ที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน อินพุตที่สมเหตุสมผลทางฟิสิกส์ และสมมติฐาน lower bound พร้อมรวมแหล่งความร้อนที่แบบจำลองก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ละเลย มันยังเพิ่มความน่าเชื่อถือด้วยการอธิบายข้อเท็จจริงต้อ ๆ สองข้อพร้อมกัน: ทำไมหินเก่ากว่า ~4 Ga แทบไม่รอด (รีไซเคิลเกือบหมด) และทำไมเปลือกที่คงอยู่เริ่มปรากฏพอดีกับช่วง bombardment ลดลง



Jack Hills ในออสเตรเลียตะวันตก จากเครื่อง ASTER ของ NASA Zircon จากบริเวณนี้รวมวัสดุเก่าแก่ที่สุดบางส่วนที่รู้จักจากเปลือกโลกยุคต้น เป็นเบาะแสเล็ก ๆ จากบรมยุคที่หินส่วนใหญ่ถูกลบออก

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

ข้อจำกัดก็ขัดแย้ง ๆ กัน และเป็นข้อจำกัดของแบบจำลอง deep time ทุกชนิด: เป็นแบบจำลองซ้อนบนแบบจำลอง ยึดกับบันทึกหินที่บางมาก และข้อสรุปที่นำไปพาดพิงที่สุด — “plate tectonics ไม่น่าเป็นไปได้” — เป็นการอนุมาน ไม่ให้การสังเกต ทำที่ที่เหมาะสมมองว่าเป็นสมมติฐานที่แข็งแรงและให้เหตุผลดี ซึ่งจัดกรอบ Hadean ใหม่และเชิญให้คนอื่นทดสอบสมมติฐาน — โดยเฉพาะการเลือกแบบจำลอง impact flux — ไม่ใช่คดีที่ปิดแล้ว

สรุปที่มีประโยชน์ที่สุดไม่ใช่ “Hadean เป็นแบบนี้แน่” และไม่ใช่ “มันก็แค่ การจำลอง” แต่คือ: ภายใต้อินพุตที่สมเหตุสมผลและอนุรักษ์นิยม โลกยุคต้นที่ถูกกลืนหนักรวมจะมีเปลือกบาง กึ่งหลอม และรีไซเคิลตัวเอง — และแนวคิดเดียวนี้อธิบายสิ่งเล็กน้อยที่เรามองเห็นจริงได้มากจนน่าประหลาด

ทำไมจึงสำคัญ

ภาพยอดนิยมของโลกยุคต้นมักกว้างระหว่างสหัสวรรษสองฝั่ง: โลกน้ำสงบที่มี plate tectonics คล้ายวันนี้ หรือดาวเคราะห์ลาวา นรก งานนี้วาดกลางทางที่เฉพาะและมีฐานฟิสิกส์: เปลือกบางที่ถูกหลอมซ้ำจากความลึกเพียงไม่กี่กิโลเมตร ถูกทำลายและสร้างใหม่ต่อเนื่อง โดยการชน — ไม่ใช่ความร้อนภายใน — เป็นตัวกำหนดเงื่อนไข

การจัดกรอบใหม่นี้ทำงานจริง มันเสนอกลไกเดียวสำหรับข้อเท็จจริงใหญ่สองข้อเกี่ยวกับวิวัฒนาการของโลก — การแทบไม่มีบันทึกหิน และเวลาที่ทวีปคงทนสุดแรกปรากฏ — พร้อมวางกระบวนการที่มักถูกละเลยอย่าง impact heating ไว้กลางเรื่อง หากยืนระยะได้ มันจะเปลี่ยนวิธีคิดว่าโลกกลายเป็นดาวเคราะห์ที่มีทวีปเสถียรเมื่อใด และยังนำไปใช้คิดกับโลกหินดวงอื่นที่ก่อตัวภายใต้การถล่มของตัวเองได้

ทั้งหมดนี้ไม่ต้องการให้แบบจำลองเป็นคำสุดท้าย แต่ต้องเป็นสมมติฐานที่ดีพอจะทดสอบ — และด้วยการผูกตัวเองกับบันทึก zircon และ isotope ที่รอด มันก็เป็นเช่นนั้น “hidden Hadean” ในชื่อคือประเด็นพอดิ: ยุคที่เราเข้าถึงได้แทบเฉพาะด้วยการสร้างแบบจำลอง เพราะยุคนั้นลบหลักฐานของตัวเองไปแล้ว

สรุป

บรมยุคแรกของโลก Hadean (ก่อน ~4.03 Ga) แทบไม่มีบันทึกหิน งานแบบจำลองนี้ถามว่าเปลือกจะเป็นอย่างไรเมื่อรวมแหล่งความร้อนที่ถูกถล่มไว้: การชน โดยใช้แบบจำลอง impact flux แบบ stochastic ที่ลดลงตามเวลา ร่วมกับ การจำลอง 1D และ 2D ที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน ของการไหลความร้อนในเปลือกและ mantle (รวมความร้อนที่ magma ลอยขึ้นพามา) ผู้เขียนพบว่าความร้อนจากการชนที่รวมตามเวลาจะสูงกว่าความร้อนภายในโลกทั้งหมดอย่างน้อยหนึ่งลำดับขนาดตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ผลคือเปลือกบาง (ต่ำกว่า ~5 กม.) ที่หลอมบางส่วนตั้งแต่ความลึกเพียงไม่กี่กิโลเมตร และที่ ~5 กม. หลอมมากกว่า 30% — อ่อนเกินกว่าจะรองรับ plate tectonics ซึ่งผู้เขียนเรียกว่าไม่น่าเป็นไปได้สำหรับ Hadean เปลือกแบบนี้จะรีไซเคิลกลับลง mantle เกือบหมด อธิบายได้ว่าทำไมวัสดุ Hadean จึงรอดน้อยมาก; เมื่อ impact ลดลงผ่านช่วง 4.0–3.9 Ga เปลือกทวีปที่อยู่รอดจึงก่อตัวได้ ราวเดียวกับที่หิน felsic รอดเก่าแก่ที่สุดปรากฏ — “น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ” ตามถ้อยคำระวางของผู้เขียน เพราะทีมตั้งใจใช้ heating แบบอนุรักษนิยมและ lower bound ผลเชิงคุณภาพจึง robust แม้ตัวเลขละเอียดไม่ได้ถูกต้อง นี่เป็นแบบจำลองวิวัฒนาการของโลกที่แข็งแกร่งและสอดคล้อง — ไม่ใช่การสังเกตโดยตรง

ประเมินแบบไม่เกินจริง

งานวิจัยแสดงอะไร: ใน การจำลอง ที่มีฐานฟิสิกส์และรวม impact heating กับ การชนความร้อนโดย magma เปลือก Hadean ออกมาบางและหลอมบางส่วนเพียงไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น โดยความร้อนจากการชนครองเหนือความร้อนภายใน รีไซเคิลกลับ mantle เกือบหมด และ — ในแบบจำลองนี้ — ไม่สามารถรองรับ plate tectonics

อะไรที่เป็นไปได้แต่ยังไม่พิสูจน์: การชนเป็นเหตุให้ทวีปคงทนปรากฏราว 3.9 Ga; Hadean เป็นโลกแบบ stagnant- หรือ squishy-lid แทน plate tectonics ยุคต้น; หิน Hadean แทบไม่รอดโดยเฉพาะเพราะเปลือกหลอมรีไซเคิลตัวเอง

มันไม่ได้แสดงอะไร: การวัดเปลือก Hadean โดยตรง; คำตอบที่ปิดข้อถกเถียง plate tectonics; ความเชื่อมโยงเชิงเหตุที่พิสูจน์แล้วระหว่าง bombardment ที่ลดลงกับทวีปแรก; ว่า zircon Jack Hills คือทวีปที่รอด; หรือแบบจำลองโลกยุคต้นแบบสมบูรณ

ข้อจำกัดหลัก: บันทึกหิน Hadean แทบไม่มี ดังนั้นผลเป็นแบบจำลองที่ถูกบังคับด้วยข้อมูลน้อยมาก; ซ้อนแบบจำลองต่อกัน (impact flux → geodynamics → phase equilibria); impact flux เองเป็นตัวเลือกตัวแทนที่ไม่แน่นอน; การจำลอง เป็น

idealized (1D และ slice เส้นศูนย์สูตร 2D, snapshot ตามเวลา) สมมติฐาน lower bound แบบอนุรักษนิยมทำให้ข้อสรุปเชิงคุณภาพแข็งแกร่งขึ้น แต่ไม่ได้ทำให้ geotherm รายละเอียดแม่นยำ

ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน? สูงว่าภายใต้ฟิสิกส์ที่สมเหตุผล โลกยุคต้นซึ่งถูกกล่มหนักจะมีเปลือกร้อน บาง และหลอมตื้นปานกลางว่าสิ่งนี้ทำให้ plate tectonics ใน Hadean ไม่น่าเกิดและอธิบายบันทึกหินที่หายไป ต่อดัชนีอ้างอิงว่านี่ *พิสูจน์* ว่าทวีปก่อตัวอย่างไรหรือเมื่อใดพอดี — นี่คือแบบจำลองอนุรักษนิยมที่แข็งแกร่งและจัดกรอบ Hadean ใหม่ ไม่ใช่การมองตรงไปยังยุคนั้น

แหล่งข้อมูล

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