The Clean Paper

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

ቀጭን፣ በከፊል የቀለጠ የመጀመሪያ crust፤ Hadeanን internal heat ሳይሆን impacts እንደተቆጣጠሩት የሚያሳይ model

የምድር የመጀመሪያ eon፣ Hadean፣ rock record ማለት ይቻላል አልተወም። ይህ modelling study ብዙ early-Earth models የሚተዉትን heat source — impacts — ሲጨምር crustው ምን ይመስል እንደነበር ይጠይቃል። Stochastic በጊዜ የሚቀንስ impact-flux model እና benchmarked crust/mantle heat-flow simulations በመጠቀም፣ ደራሲዎቹ impact heat ለአብዛኛው Hadean ከምድር ሙሉ internal heat ቢያንስ በአንድ order of magnitude እንደሚበልጥ አግኝተዋል። ይህ ከ~5 km በታች ቀጭን፣ ከጥቂት kilometres በታች partially molten እና plate tectonicsን ለመደገፍ በጣም ደካማ crust ይሰጣል። Impacts ~3.9 Ga በኋላ ሲቀንሱ ዘላቂ continental crust ሊፈጠር ቻለ የሚለው ጥናቱ ዋና inference ነው። ይህ ጠንካራ conservative model ነው፣ ቀጥታ observation አይደለም።

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

የምድር ታሪክ ገጾቹ ሁሉ ማለት ይቻላል የጠፉበት ምዕራፍ

ምድር እስካሁን በምናውቃቸው ፕላኔቶች መካከል አህጉራት — ተንሳፋፊ፣ silica-rich የሆነ እኛ የምንኖርበት መሬት — ያላት ብቸኛዋ ናት። ግን አህጉራት መጀመሪያ እንዴት እንደተፈጠሩ በgeology ውስጥ ካሉ አሮጌ ያልተፈቱ ጥያቄዎች አንዱ ነው፣ እና ምክንያቱ ከባድ ነው፤ ማስረጃው ሙሉ በሙሉ ማለት ይቻላል ጠፍቷል።

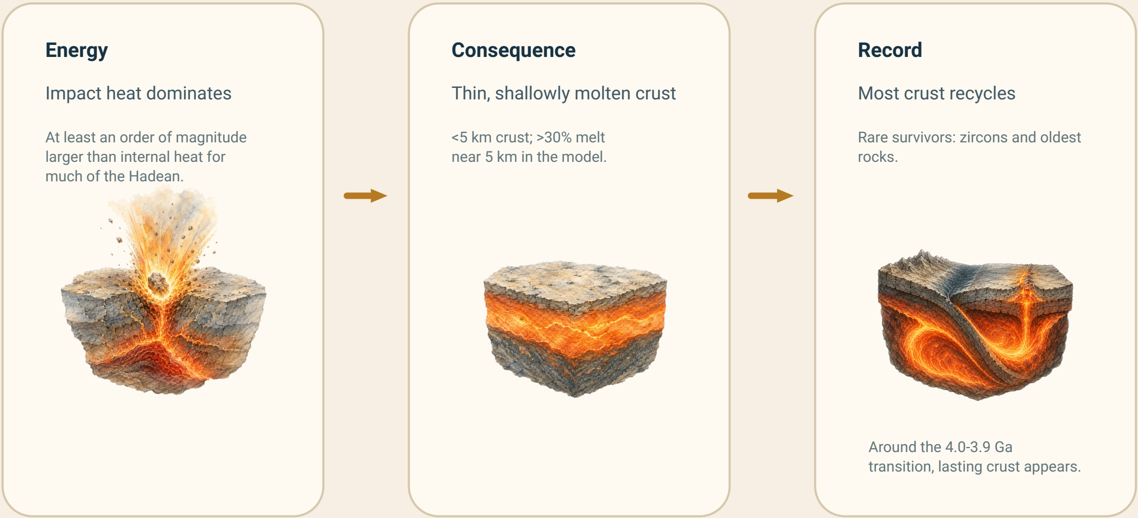
የምድር የመጀመሪያ ዘመን፣ Hadean፤ ፕላኔትዋ ከተፈጠረችበት ጊዜ እስከ ከ4.03 ቢሊዮን ዓመታት በፊት (Ga) ገደማ ድረስ ይዘልቃል። ከዚያ የመጀመሪያዎቹ ግማሽ ቢሊዮን ዓመታት ምንም ማለት ይቻላል አልተረፈም። በሙሉ የተጠበቁት አሮጌ ፌልሲክ (አህጉራዊ ዓይነት) ዐለቶች ወደ 4.03 Ga ናቸው። ጥቂት አልፎ አልፎ የሚገኙ ባሳልቲክ ዐለቶች ~4.2 Ga ድረስ ይደርሳሉ። ከሁሉ አሮጌው የተረፈ ቁሳቁስ የተበተኑ የዚርኮን ክሪስታሎች ናቸው — በተለይ ከምዕራባዊ አውስትራሊያ Jack Hills — 4.4 Ga የተባሉ። ይህ ነው የምድር የሕፃንነት ሙሉ መዝገብ፤ ጥቂት ቦታዎች እና የአሸዋ ቅንጣት መጠን ያላቸው ጥቂት ማዕድናት።

ይህ ጥናት ወደዚያ መዝገብ አዲስ ዐለት አይጨምርም። ሌላ ነገር ያደርጋል፤ በተወሰነ ፊዚክስ ስር Hadean የምድር ቅርፊት ምን ይመስል እንደነበር አካላዊ ሞዴል ይገነባል፣ እና ብዙ ቀደምት-Earth ሞዴሎች የሚተዉትን ጥያቄ ይጠይቃል። ቀደምት Earth በተከታታይ በግጭቶች እየተመታች እንደነበረች ችላ ማለት ብናቆም ምን ይከሰታል?

ደራሲዎቹ የደረሱበት መልስ ጎልቶ የሚታይ ነው። ለአብዛኛው Hadean በግጭቶች የገባ ሙቀት ከምድር ውስጣዊ ሙቀት ሁሉ በእጅጉ የበለጠ ሊሆን ነበር፣ የምድር ቅርፊትውን ቀጭንና በከፊል ቀልጦ እንዲቆይ በማድረግ — እንደ modern ፕሌት ቴክቶኒክስ ያለ ሥርዓት ለመደገፍ በጣም ደካማ፣ ይላሉ ደራሲዎቹ። ይህ ሞዴል ነው፣ የተጠበቀ ትውስታ አይደለም። ግን ቢያንስ የሚገልጸውን ዘመን ግፍ በሞዴሉ ውስጥ ለማስገባት የሚሞክር ሞዴል ነው።

A model of the Hadean, not a memory of it

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



ግጭት ሙቀት በሞዴሉ የኃይል ሚዛን ውስጥ ዋና ይሆናል፣ ቀጭንና በቅርብ ጥልቀት የቀለጠ የምድር ቅርፊት ያለማቋረጥ እንደገና ወደ ማንትል ይመልሳል፣ እና ዘላቂ አህጉራዊ የምድር ቅርፊት የሚታየው 4.0–3.9 Ga የሽግግር ወቅት አካባቢ ብቻ ነው። ይህ የHadean ሞዴል ነው፣ ቀጥታ የተጠበቀ መዝገብ አይደለም።

The Clean Paper CC BY 4.0

ደራሲዎቹ ምን አደረጉ?

ቡድኑ ብዙውን ጊዜ ተለያይተው የሚታዩ ሦስት ክፍሎችን አንድ ላይ አጣመረ።

መጀመሪያ፣ ***የግጭት ፍሰት ዘፈቀዳዊ ሞዴል*** — በHadean እና ቀደምት Archean ውስጥ አስትሮይዶች እና ትልልቅ አካላት ወደ የውስጠኛው የፀሐይ ሥርዓት የሚወርዱበት የግጭት ዝናብ። ጠቃሚ ልዩነቱ፣ ይህ አሮጌው አንድ ጊዜ የተከሰተ “Late Heavy Bombardment” spike ሀሳብ አይደለም። በመጀመሪያ ከፍተኛ እና **በጊዜ ሂደት የሚቀንስ** ፍሰት ነው፣ ትልልቅ ግጭቶችም በቀድሞ በተወሰነ ጊዜ ሰሌዳ ሳይሆን በየዘፈቀደ (stochastically) ይመጣሉ። ሞዴሉ ከጨረቃ እና inner-Solar-ሥርዓት ግጭት ስታቲስቲክስ ተመጣጥኖ ተስተካክሎ፣ zircon age ስፔክትራ እና ካለው ፓሊዮማግኔቲክ ማስረጃ ጋር እንዲስማማ ተመርጧል።

ሁለተኛ፣ ሙቀት በየምድር ቅርፊት እና የላይኛው ማንትል ውስጥ እንዴት እንደሚንቀሳቀስ የሚያሳዩ **ጂኦዳይናሚክ ማስመሰያዎች**። ከመደበኛ ውጤቶች ጋር የተፈተነ lattice-Boltzmann ኮድ (Planet_LB) ተጠቅመው ቀላል 1D የሙቀት-ከጥልቀት ጋር የሚለዋወጥ ስሌቶችንም እና በ4.1 Ga የማንትል ሙሉ 2D የኮንቬክሽን ቅጽበታዊ ምስሎችንም አስኬዱ። እነዚህ መደበኛ የውስጣዊ ሙቀት ምንጮች — ሬዲዮአክቲቭ መበስበስ እና ከዋና የሚመጣ ሙቀት — ያካትታሉ፣ ከዚህ በተጨማሪ ጠቃሚ **ማግማዊ የሙቀት መጓጓዣንም** ያካትታሉ፤ በላይ ወደ ላይ የሚወጣ ቀልጦ ያለ ዐለት የሚሸከመው ሙቀት፣ ብዙ የምድር ቅርፊት የሙቀት ሞዴሎች የሚተዉት።

ሦስተኛ፣ የተጨባጭ ቀደምት የምድር ቅርፊት — ከNuvvuagittuq greenstone belt የተወሰደ ውሃ የያዘ Hadean ሜታባሳልት — **የፌዝ ሚዛናዊነት ሞዴሊንግ** በማድረግ እንዲህ ያለ ዐለት በምን በምን የሙቀት መጠንና ጥልቀት መቅለጥ እንደሚጀምር አወጡ።

ሙሉ ጽሑፉን ለማንበብ ዋና የሆነ አንድ የዘዴ ምርጫ አለ፤ ደራሲዎቹ በፈቃዳቸው ሁኔታዎቹን በራሳቸው መደምደሚያ ላይ እንዲከብዱ አደረጉ። ከየቾንድሪቲክ ማጣቀሻ ያነሰ ሙቀት የሚያመነጭ ሬዲዮአክቲቭ ቁሳቁስ የያዘ “ቾንድሪቲክ ያልሆነ” ማንትል ተጠቅመዋል፣ ይህም ከመደበኛ ሞዴል ግማሽ በታች ውስጣዊ ማሞቅ አለው። ጥንቃቄ ያላቸው የማሞቅ መጠኖች ተጠቅመዋል፣ እና ከወጣትና ለምድር ቅርብ ከነበረች ጨረቃ የሚመጣ በማዕበል ኃይል የሚፈጠር ማሞቅን ተዉት። ስለዚህ የተሰሉት የምድር ቅርፊት ሙቀቶች **ዝቅተኛ ግምቶች** ናቸው — የታችኛው ወሰኖች። እነሱ ከሠሩት ሞዴል ይልቅ እውነተኛው Hadean ምናልባት ይበልጥ ሙቅ ነበር።

ምን አገኙ?

Hadean **የኃይል ሚዛን ውስጥ ዋናው ግጭቶች ነበሩ፣ ውስጣዊ ሙቀት አይደለም።** ግጭት ሙቀት በጊዜ ላይ ሲዋሃድ ውስጣዊውን የሙቀት አስተዋፅዖን በእጅጉ ይበልጣል — ለአብዛኛው Hadean ቢያንስ በአንድ አሥር እጥፍ። በዚህ ምስል፣ ቀደምት ቴክቶኒክ እንቅስቃሴን የሚነዳው ሬዲዮአክቲቭ መበስበስ ሳይሆን ግጭት ማሞቅ ነው፣ እና ዋና ሚናው የሚደበዝዘው 3.9 Ga ገደማ ከደረሰ በኋላ ብቻ ነው።

ያ ሙቀት የምድር ቅርፊትውን ቀጭንና በቅርብ ጥልቀት ቀልጦ እንዲቆይ አደረገ። ግጭቶች እና በሚወጣ ቀለጠ ዐለት የሚጓጓዝ ሙቀት ሳይጨመሩ ሞዴሉ Hadean የምድር ቅርፊት ከ10–15 km በታች ብቻ በከፊል የቀለጠ ያደርገዋል። ግጭት ሙቀት ሲጨመር የመቅለጥ ዞን በእጅጉ ወደ ላይ ይወጣል፤ የምድር ቅርፊትው ከጥቂት ኪሎሜትሮች በታች — 2–5 km ገደማ በታች — በከፊል የቀለጠ ይሆናል። 5 km ገደማ ጥልቀት ላይ ሞዴሎች ከ30% በላይ መቅለጥ ይገምታሉ፣ ይህም ዐለት እንደ ጠንካራ ፕሌት አንድ ላይ ለመቆየት በጣም ደካማ የሆነበት ሁኔታ ነው። 5–10 km ላይ ~1000–1100°C ሙቀቶች ከየዐለቱ አወቃቀር ብዙ ሳይወሰን የምድር ቅርፊትው በስፋት ቀልጦ ያለ እንደሚሆን ያሳያሉ። የተረፈው ጠጣር የምድር ቅርፊት ቀጭን፣ ከ5 km ገደማ በታች ይሆን ነበር።

በከፊል የቀለጠ የምድር ቅርፊት የራሱን መዝገብ ያጠፋል። በስፋት መቅለጥ ጥቅጥቅ ያለ፣ በብረትና ማግኒዥየም የበለፀገ

ቁሳቁስ እንዲወርድና እንዲለይ ያስችላል፣ ቀላል በሲሊካ የበለፀጉ ቀልጠው ያሉ ዐለቶች ግን ወደ ላይ ይወጣሉ። በጊዜ ሂደት ይህ የምድር ቅርፊቱን አማካይ ቅንብር ወደ ይበልጥ ይበልጥ የተለወጡና በሲሊካ የበለፀጉ ቅንብሮች ይገፋዋል፣ እና ዚርኮን ሊፈጠርበት የሚችል ፌልሲክ ቀልጦ ያለ ዐለት ይፈጥራል። ከዚህ ቀጭን የምድር ቅርፊት አብዛኛው ወደ በኮንቬክሽን ወደሚንቀሳቀሰው ማንትል እንደገና ይመለስ ነበር፣ ይህም ከኬሚካላዊ (አይሶቶፒክ) መዝገብ ጋር ይስማማል። በዚህ ሞዴል ውስጥ Hadean ዐለት ሙሉ በሙሉ ማለት ይቻላል አለመኖሩ በመዝገብ ውስጥ ባዶ ቦታ አይደለም — ትንበያ ነው። 4.2 Ga ዐለቶች እና 4.4 Ga ዚርኮኖች በተፈጠረበት ፍጥነት ማለት ይቻላል የተደመሰሰ የምድር ቅርፊት አልፎ አልፎ የተረፉ ናቸው።

ከባድ የግጭት ዘመኑ ማብቃት ከመጀመሪያዎቹ ዘላቂ አህጉራት ጊዜ ጋር ይገጥማል። ከባድ ግጭቶች በ4.0–3.9 Ga የሽግግር ወቅት ላይ ሲቀንስ የምድር ቅርፊትው በመጨረሻ ሊወፍርና ሊቆይ ይችል ነበር። ከሁሉ አሮጌ የተረፉ አህጉራዊ ዐለቶች በተመሳሳይ የሽግግር ወቅት አካባቢ ይታያሉ። ደራሲዎቹ በጥንቃቄ ይላሉ፤ ዘላቂ አህጉራዊ የምድር ቅርፊት በዚህ ጊዜ መታየቱ “ምናልባት የአጋጣሚ ነገር አይደለም” ነው።

ዋና መደምደሚያቸው፤ በእነዚህ ሁኔታዎች — ቀጭን የምድር ቅርፊት፣ ከጥቂት ኪሎሜትሮች በታች ቀልጦ ያለ — Hadean **ፕሌት ቴክቶኒክስ የማይመስል ነው።**

ቀደምት ጥናቶች ለምን ተቃራኒ ውጤት እንዳገኙም ያሳያሉ። ቀድሞ በዘፈቀደ የሚከሰቱ ግጭቶችን ያጠኑ ጥናቶች በማንኛውም ጊዜ ከምድር ቅርፊት 2.5% በታች ብቻ ቀልጦ ያለ የሆነ ትንሽ ተፅዕኖ አግኝተው ነበር። እነዚያ ጥናቶች ይህ ጥናት የሚያካትታቸውን ሁለት ነገሮች ተዉ፤ ትልልቅ ግጭቶች በማንትል ጥልቅ መቅለጥ ላይ ያላቸው አጠቃላይ ተፅዕኖ፣ እና ያንን ሙቀት በወደ ላይ በሚወጣ ማግማ ወደ ላይ ማጓጓዝ። እነዚህን ሲመልሱ የሙቀት ምስሉ በጣም ይለወጣል።

ሞዴል ትውስታ አይደለም

ከላይ ያለው ሁሉ የማስመሰያዎቹ ውጤት ነው፣ ከየHadean ዐለቶች በቀጥታ የተወሰደ ቀጥተኛ ንባብ አይደለም — ምክንያቱም እነዚያ rocks ሙሉ በሙሉ ማለት ይቻላል አሁን አይኖሩም። ይህ ውጤቱን ደካማ አያደርገውም፣ ግን ምን ዓይነት ውጤት እንደሆነ ይወስናል።

የሞዴሉ ሰንሰለት እንዲህ ይሄዳል፤ የግጭት ፍሰት ሞዴል ወደ ማንትል እና የምድር ቅርፊት የሙቀት ፍሰት ሞዴል ይገባል፣ እሱም አንድ የተወሰነ ዐለት እንዴት እንደሚቀልጥ በሚያሳይ ሞዴል ጋር ይፈተናል። እያንዳንዱ ደረጃ በፊዚክስ የተመሰረተ ነው እና በሚቻልበት ቦታ ከታወቁ ውጤቶች ጋር የተፈተነ ነው፣ ግን ሙሉው ሰንሰለት ምክንያታዊ ፊዚክስ እውነት ከሆነ Hadean ምን ይመስል እንደነበረ መሆን ያለበት ላይ የተደራጀ ሙግት ነው፤ በእውነት ምን ይመስል እንደነበረ ቀጥታ መለኪያ አይደለም።

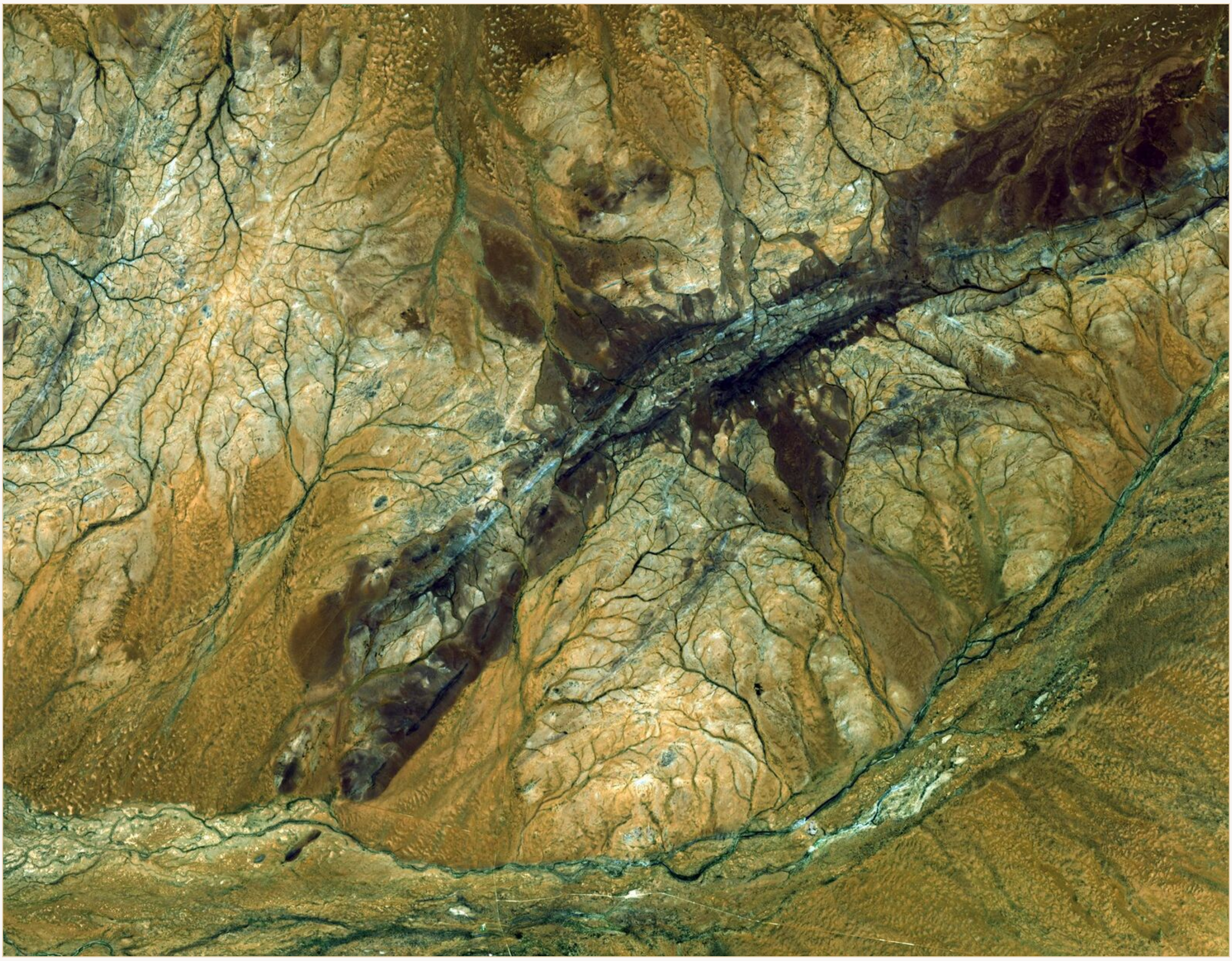
ለዚህ ነው የደራሲዎቹ ጥንቃቄ ያለው ግምቶች ከመጀመሪያ የሚመስለው በላይ ጠቃሚ የሆኑት። የታችኛውን ወሰን የሚወክል ማሞቅ ቢመርጡም በስፋት ቀልጦ ያለ የሆነ በቅርብ ጥልቀት ያለ የምድር ቅርፊት አግኝተዋል፣ ስለዚህ ጥራታዊ መደምደሚያ — Hadean የምድር ቅርፊት ሙቅና ደካማ ነበር — ከምርጫዎቻቸው በጣም አይወሰንም። በዚህ የማይወሰነው ትክክለኛው ቁጥር ነው፤ ትክክለኛ የሙቀት-ጥልቀት መገለጫዎች፣ ትክክለኛ የቀለጠ ክፍል ድርሻዎች እና ትክክለኛ የምድር ቅርፊት ውፍረት። የውጤቱን አቅጣጫ ጠንካራ አድርገን ልናነበው እንችላለን፣ የቁጥሮቹ ዝርዝር ግን ጊዜያዊ ግምት ነው።

ይህ ምን አያረጋግጥም?

- Hadean የምድር ቅርፊትን በቀጥታ አያይም። ከዚህ ዘመን ዐለት ማለት ይቻላል የለም፤ ይህ ፊዚክስ ምን እንደሚያመለክት የሞዴሊንግ ውጤት ነው፣ መለኪያ አይደለም።
- “Late Heavy Bombardment” ላይ አይመሰረትም። የተጠቀሙት የግጭት ፍሰት በጊዜ የሚቀንስ ዘፈቀዳዊ ፍሰት ነው፤ ሞዴሉ ድንገተኛ ድንገተኛ የግጭት ጭማሪ አያስፈልገውም እና አይጠቀምበትም።
- Plate-tectonics debateን አይዘጋም። “Implausible” እዚህ በፊዚክስ የተመሰረተ ጠንካራ መደምደሚያ ነው፣ ሙቅ stagnant- ወይም squishy-lid ቀደምት Earthን የሚመርጥ፤ ግን የHadean tectonic mode ገና በእውነት የሚከራከርበት ጉዳይ ነው።
- ግጭቶች በ4.0–3.9 Ga የሽግግር ወቅት አካባቢ አህጉራትን እንዲፈጠሩ አስከትለዋል ብሎ አያረጋግጥም። የጊዜው መገጣጠም ጠንካራ association ነው፣ ደራሲዎቹ ራሳቸው “ምናልባት የአጋጣሚ ነገር አይደለም” ይሉታል — አሳማኝ ተዛማጅነት ለመግለጽ ጥንቃቄ ያለው ቋንቋ ነው፣ የተረጋገጠ cause አይደለም።
- Jack Hills zircons የተጠበቁ አህጉራት አይደሉም። Felsic ቁሳቁስ እና water ቀደም ብለው እንደነበሩ የሚያሳዩ አልፎ አልፎ የተረፉ grains ናቸው፤ ሞዴሉ የሚለው እነሱን የፈጠረው የምድር ቅርፊት አብዛኛው እንደገና recycled ሆኖ ጠፍቷል ነው።
- የቀደምት ምድር ሙሉ ታሪክን አይገነባም። ማስመሰያዎች ቀላል ተደርገው የተወሰዱ ናቸው — 1D profiles እና 2D equatorial slices፣ ግጭቶች በequator አቅራቢያ ተገድበው፣ እንደ snapshots የተወሰዱ — የፕላኔትዋ ሙሉ four-dimensional ሞዴል አይደሉም።

ማስረጃው ምን ያህል ጠንካራ ነው?

ዋናው አባባል — ግጭት ማሞቅ Hadean የምድር ቅርፊትን ቀጭንና በቅርብ ጥልቀት ቀልጦ ያለ እንዲሆን የሚያደርግ ዋና ተቆጣጣሪ ሂደት ነበር — ላይ ሙግትው የተጣጣመ ነው፣ እና በጠቃሚ መልኩ ጥንቃቄ ያለው ነው። Benchmarked ጂኦዳይናሚክስ ኮድ፣ በፊዚክስ ምክንያታዊ የግቤት እሴቶች እና ዝቅተኛ-ገደብ ግምቶች ይጠቀማል፣ እና ብዙ ቀድሞ ሞዴሎች ችላ ያሉትን ሙቀት ምንጭ ያካትታል። እንዲሁም ሁለት ከባድ እውነታዎችን በአንድ ጊዜ በመግለጽ ተአማኒነት ያገኛል፤ ~4 Ga በላይ የሆነ ዐለት ለምን ማለት ይቻላል አልተረፈም (ከሞላ ጎደል ሙሉ እንደገና መዘዋወር)፣ እና የግጭት ዝናብ ሲቀንስ ለምን ዘላቂ የምድር ቅርፊት በዚያኑ ጊዜ ይታያል።



Jack Hills፣ ምዕራባዊ አውስትራሊያ፣ በየNASA ASTER መሣሪያ እንደታየ። ከዚህ ክልል የሚገኙ ዚርኮኖች ከምድር ቀደምት የምድር ቅርፊት የተረፉ ከሁሉ አሮጌ ቁሳቁሶች መካከል ናቸው፤ አብዛኞቹ ዐለቶች ከጠፉበት ዘመን የተረፉ ትንሽ ፍንጮች።

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

ገደቦቹም እኩል ግልጽ ናቸው፣ እና እነዚህ ማንኛውም ጥልቅ የጂኦሎጂ ጊዜ ሞዴል የሚገናኝባቸው ገደቦች ናቸው፤ ሞዴል በሞዴል ላይ የተገነባ፣ በጣም ትንሽ ዐለት መዝገብ ላይ የተመሰረተ፣ እና በቀላሉ የሚጠቀሰው “ፕሌት ቴክቶኒክስ is ሊሆን የማይችል” መደምደሚያ ምልከታ ሳይሆን መደምደሚያ ነው። ትክክለኛው አቋም ይህን Hadeanን እንደገና የሚያቀርብ ጠንካራ፣ በአመክንዮ የተደገፈ መላምት አድርጎ ማየት ነው፣ የተዘጋ ጉዳይ ሳይሆን ሌሎች ደራሲዎች ግምቶችዎቹን — በተለይ የግጭት-ፍሰት ሞዴል ምርጫ — እንዲፈትኑ የሚጋብዝ።

በጣም ጠቃሚው ማጠቃለያ “Hadean እንዲህ ነበር” አይደለም፣ “ማስመሰል ብቻ ነው”ም አይደለም። እንዲህ ነው፤ ምክንያታዊና ጥንቃቄ ያለው ፊዚክስ ከተጠቀምን፣ በተደጋጋሚ ከባድ ግጭቶች የተመታች ቀደምት ምድር ቀጭን፣ በከፊል ቀልጦ ያለ፣ ያለማቋረጥ ወደ ማንትል የሚመለስ የምድር ቅርፊት ሊኖራት ይገባል — እና ይህ አንድ ሀሳብ ከእውነት ልናየው ከቻልነው ጥቂት ማስረጃ አስገራሚ መጠን ያስረዳል።

ለምን ይጠቅማል?

የቀደምት ምድር የተለመደ ምስል በሁለት ጽንፎች መካከል ይንቀሳቀሳል፤ ዛሬን የሚመስል ጸጥ ያለ የፕሌት ቴክቶኒክስ የሚሠራበት ጸጥ ያለ የውሃ ዓለም፣ ወይም እንደ ሲኦል የሚመስል በላቫ የተሸፈነች ፕላኔት። ይህ ሥራ በፊዚክስ የተመሰረተ አንድ የተወሰነ መካከለኛ ምስል ይስላል፤ ቀጭን የምድር ቅርፊት፣ ከጥቂት ኪሎሜትሮች በታች ደጋግሞ የሚቀልጥ፣ ያለማቋረጥ የሚፈርስና እንደገና የሚሠራ፣ እና ሁኔታዎቹን የሚወስኑት ውስጣዊ ሙቀት ሳይሆን ግጭቶች።

ይህ አዲስ አቀራረብ በእውነት ሥራ ይሠራል። ስለምድር የመጀመሪያ ዘመን ሁለት ትልልቅ እውነታዎች — ዐለት መዝገብ ሙሉ በሙሉ ማለት ይቻላል አለመኖሩ፣ እና የመጀመሪያዎቹ ዘላቂ አህጉራት የሚታዩበት ጊዜ — ለሁለቱም አንድ አሠራር ያቀርባል፤ እና ብዙውን ጊዜ ችላ የሚባለውን ግጭት ማሞቅ በታሪኩ መሀል ያስቀምጣል። እሱ ከተረጋገጠ ምድር መቼ ዘላቂ አህጉራት ያላት ፕላኔት እንደሆነች የምናስብበትን መንገድ ይለውጣል፣ እና በራሳቸው ከባድ የግጭት ዘመን ውስጥ የተፈጠሩ ሌሎች ዐለታማ ዓለሞች ላይም ይተገበራል።

ይህ ሁሉ ሞዴሉ የመጨረሻ ቃል መሆን አያስፈልገውም። ለመፈተን በቂ ጥሩ መላምት መሆን ብቻ ያስፈልገዋል — እና ከተረፈው የዚርኮን እና የአይሶቶፕ መዝገብ ጋር ራሱን በማገናኘት ይህን ያደርጋል። በርዕሱ ውስጥ “የተደበቀው Hadean” የሚለው ነጥብ ይህ ነው፤ እሱ የራሱን ማስረጃ ስላጠፋ በአብዛኛው ሞዴሊንግ ብቻ ልንደርስበት የምንችለው ዘመን።

ንጹህ ማጠቃለያ

የምድር የመጀመሪያ ዘመን፣ Hadean (ከ~4.03 Ga በፊት)፣ ዐለት መዝገብ ማለት ይቻላል አልተወም። ይህ የሞዴል ጥናት ብዙውን ጊዜ የሚተው ሙቀት ምንጭ — ግጭቶች — ሲጨመር የምድር ቅርፊትው ምን ይመስል እንደነበር ይጠይቃል። Stochastic፣ በጊዜ የሚቀንስ የግጭት-ፍሰት ሞዴሉን ከከታወቁ ውጤቶች ጋር የተፈተነ 1D እና 2D ማስመሰያዎች የምድር ቅርፊትና የማንትል ሙቀት ፍሰት ጋር — ወደ ላይ የሚወጣ ቀለጠ ዐለት የሚሸከመውን ሙቀት ጨምሮ — በመጠቀም ደራሲዎቹ በጊዜ የተዋሃደ ግጭት ሙቀት ለአብዛኛው Hadean ከምድር ሙሉ ውስጣዊ ሙቀት ቢያንስ በአንድ አሥር እጥፍ የበለጠ እንደሚሆን አግኝተዋል። ውጤቱ ቀጭን የምድር ቅርፊት (ከ~5 km በታች)፣ ከጥቂት ኪሎሜትሮች በታች በከፊል የቀለጠ፣ እና ~5 km ጥልቀት ላይ ከ30% በላይ የቀለጠ የሆነ ነው — ፕሌት ቴክቶኒክስን ለመደገፍ በጣም ደካማ፣ ደራሲዎቹም Hadean ፕሌት ቴክቶኒክስን ሊሆን የማይችል ይሉታል። እንዲህ ያለ የምድር ቅርፊት አብዛኛው ወደ ማንትል እንደገና እንደገና ወደ ማንትል ሊመለስ ይችላል፣ ይህም Hadean ቁሳቁስ ለምን እጅግ ትንሽ እንደተረፈ ያስረዳል። ግጭቶች በ4.0–3.9 Ga የሽግግር ወቅት ሲቀንሱ ዘላቂ አህጉራዊ የምድር ቅርፊት ሊፈጠር ቻለ፣ በዚያኑ ጊዜ የአርጌዎቹ የተረፉ ፌልሲክ ዐለቶች ይታያሉ — “ምናልባት የአጋጣሚ ነገር አይደለም” በደራሲዎቹ ጥንቃቄ ያለው ቃል። ደራሲዎቹ በፈቃዳቸው ጥንቃቄ ያለው፣ ዝቅተኛ-ገደብ ማሞቅ ስለተጠቀሙ ጥራታዊ ውጤትው ጠንካራ ነው፣ ትክክለኛ ቁጥሮቹ ግን ቋሚ አይደሉም። ይህ ስለምድር የመጀመሪያ ዘመን ጠንካራ፣ የተጣጣመ ሞዴል ነው — ቀጥታ ምልከታ አይደለም።

ያለ ማጋነን ማረጋገጫ

ጽሑፉ የሚያሳየው: ግጭት ማሞቅ እና የማግማ ሙቀት መጓጓዣን በሚያካትቱ በፊዚክስ ላይ የተመሰረቱ ማስመሰያዎች ውስጥ Hadean የምድር ቅርፊት ቀጭንና ከጥቂት ኪሎሜትሮች በታች በከፊል የቀለጠ ሆኖ ይወጣል፣ ውስጣዊ ሙቀት ሳይሆን ግጭት ሙቀት ይቆጣጠረዋል፣ አብዛኛው ወደ ማንትል እንደገና ወደ ማንትል ይመለሳል፣ እና — በዚህ ሞዴል — ፕሌት ቴክቶኒክስን መደገፍ አይችልም።

ሊሆን የሚችል ግን ያልተረጋገጠው: ግጭቶች 3.9 Ga አካባቢ ዘላቂ አህጉራት የሚታዩበት ምክንያት መሆናቸው፤ Hadean ቀደምት የፕሌት ቴክቶኒክስ ዓለም ሳይሆን stagnant-lid ወይም squishy-lid ዓለም መሆኑ፤ እና Hadean ዐለት ማለት ይቻላል አለመቆየቱ ቀልጦ ያለ የምድር ቅርፊት ወደ ማንትል ተመልሶ ስለተቀየረ መሆኑ።

የማያሳየው: Hadean የምድር ቅርፊት ቀጥታ መለኪያ፤ ለየፕሌት ቴክቶኒክስ ክርክር የተዘጋ መልስ፤ ከባድ ግጭቶች መቀነሳቸውና የመጀመሪያ አህጉራት መታየታቸው መካከል የተረጋገጠ የምክንያት ግንኙነት፤ Jack Hills zircons የተጠበቁ አህጉራት መሆናቸው፤ ወይም የቀደምት ፕላኔት ሙሉ ሞዴል።

ዋና ገደቦች: Hadean ዐለት መዝገብ ማለት ይቻላል የለም፣ ስለዚህ ውጤቱ በትንሽ መረጃ የተገደበ ሞዴል ነው፤ ሞዴሎች በሞዴሎች ላይ ይደረደራሉ (የግጭት ፍሰት → ጂኦዳይናሚክስ → የፌዝ ሚዛናዊነት)፤ የግጭት ፍሰት ራሱ ወካይ ግን ያልተረጋገጠ ምርጫ ነው፤ ማስመሰያዎችም ቀላል ተደርገው የተወሰዱ ናቸው (1D እና 2D የኢኳቶር ክፍሎች፣ የጊዜ ቅጽበታዊ ምስሎች)። ጥንቃቄ ያላቸው፣ የታችኛውን ወሰን የሚወክሉ ግምቶች ጥራታዊ መደምደሚያን ያጠናክራሉ፤ ግን የተወሰኑ የሙቀት-ጥልቀት መገለጫዎችን ትክክለኛ አያደርጉም።

አጠቃላይ አንባቢ ምን ያህል እምነት ሊኖረው ይገባል? Plausible ፊዚክስ ስር በከባድ የግጭት ዝናብ የተመታች ቀደምት Earth ሙቅ፣ ቀጭን፣ በቅርብ ጥልቀት ቀልጦ ያለ የምድር ቅርፊት እንደሚኖራት ከፍተኛ እምነት። ይህ Hadean ፕሌት ቴክቶኒክስን የማይመስል እንደሚያደርገውና missing ዐለት መዝገቡን እንደሚያስረዳ መካከለኛ እምነት። አህጉራት በትክክል እንዴት ወይም መቼ እንደተፈጠሩ ይህ *proves* በሚለው ላይ ዝቅተኛ እምነት — ይህ Hadeanን እንደገና የሚያቀርብ ጠንካራ፣ ጥንቃቄ ያለው ሞዴል ነው፣ ቀጥታ እይታ አይደለም።

ምንጮች

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