



The CLEAN PAPER

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

თხელი, ნახევრად molten პირველი ქერქი: მოდელი, სადაც Hadean-ს internal heat კი არა, impacts მართავდა

Earth-ის პირველი eon, Hadean, თითქმის არ ტოვებს rock record-ს. ეს modelling study კითხულობს, როგორი იქნებოდა crust, თუ impacts აღარ გამოვტოვებთ. stochastic declining impact-flux model-ისა და benchmarked crust/mantle heat-flow simulations-ის მიხედვით impact heat Hadean-ის უმეტესობაში Earth-ის მთელ internal heat-ს სულ მცირე order of magnitude-ით აჭარბებდა, რის შედეგადაც crust $< \sim 5$ km სისქის და ზედაპირიდან რამდენიმე km-ში partially molten იქნებოდა — ავტორების აზრით plate tectonics-ისთვის ძალიან სუსტი და mantle-ში მუდმივი recycling-ისკენ მიდრეკილი. impacts-ის კლების შემდეგ ~ 3.9 Ga-ზე enduring continental crust-ის ფორმირება შესაძლებელი ხდება, დაახლოებით მაშინ, როცა უძველესი surviving felsic rocks ჩნდება — „likely not a coincidence“. conservative lower-bound heating qualitative result-ს ამყარებს, თუმცა exact numbers fixed არაა. ეს Earth infancy-ის ძლიერი model-ია და არა direct observation.

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

დედამიწის ისტორიის თავი, საიდანაც თითქმის ყველა გვერდი გაქრა

დედამიწა ერთადერთი ცნობილი პლანეტაა კონტინენტებით — მსუბუქი, სილიციუმით მდიდარი ხმელეთით, რომელზეც ვცხოვრობთ. მაგრამ როგორ წარმოიქმნა პირველი კონტინენტები, გეოლოგიის ერთ-ერთი უძველესი ღია კითხვაა, სასტიკი მიზეზით: მტკიცებულება თითქმის მთლიანად გაქრა.

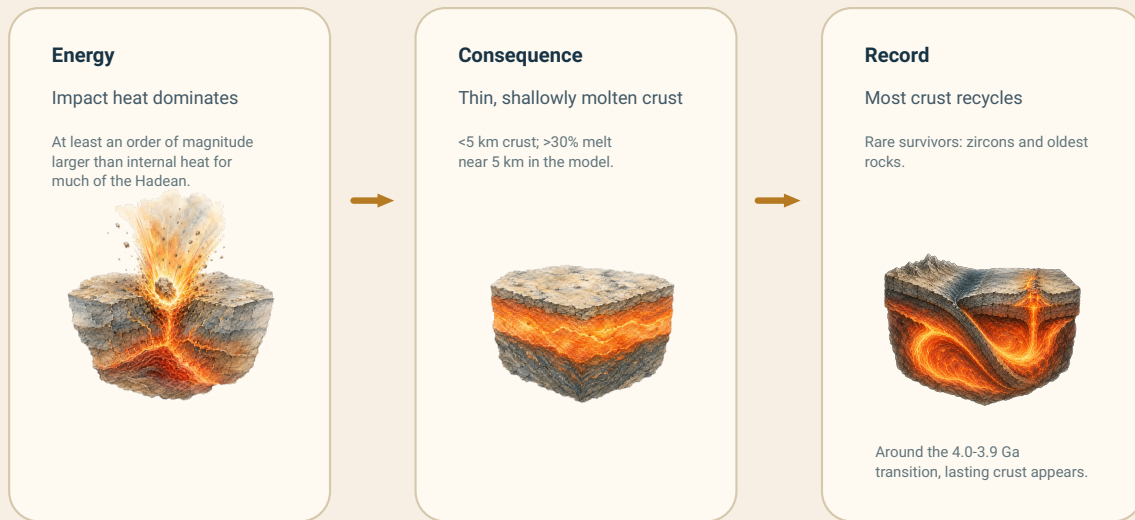
დედამიწის პირველი ეონი, ჰადეური, პლანეტის წარმოშობიდან დაახლოებით 4.03 მილიარდი წლის წინამდე (Ga) გრძელდება. ამ პირველი ნახევარი მილიარდი წლიდან თითქმის არაფერი გადარჩა. უძველესი ხელუხლებელი ფელსიკური — კონტინენტური ტიპის — ქანები დაახლოებით 4.03 Ga-ისაა. რამდენიმე იშვიათი ბაზალტური ქანი ~4.2 Ga-მდე მიდის. ყველაზე ძველი მასალა საერთოდ ცირკონის კრისტალების მცირე რაოდენობაა — განსაკუთრებით დასავლეთ ავსტრალიის ჯეკ-ჰილსიდან — 4.4 Ga ასაკით. ესაა დედამიწის ადრეული ისტორიის თითქმის მთელი არქივი: რამდენიმე ადგილი და ქვიშის მარცვლის ზომის მინერალები.

ეს კვლევა არქივს ახალ ქანს არ უმატებს. სხვა რამეს აკეთებს: ჰადეური ქერქის ფიზიკურ მოდელს აგებს და კითხულობს იმას, რასაც ადრეული დედამიწის მოდელები ხშირად გვერდს უვლის. რა ხდება, თუ აღარ ვაიგნოვებთ, რომ ადრეულ დედამიწას მუდმივად ბომბავდნენ?

ავტორების პასუხი მკვეთრია. ჰადეურის უმეტეს ნაწილში შეჯახებებით შემოტანილი სითბო დედამიწის მთელ შიდა სითბოს აჭარბებდა და ქერქს თხელ, ნაწილობრივ გამდნარ მდგომარეობაში ტოვებდა — იმდენად სუსტს, რომ, მათი აზრით, თანამედროვე ფილების ტექტონიკის მსგავსი რეჟიმი ვერ იმუშავებდა. ეს **მოდელია და არა პირდაპირი კვალი**. მაგრამ მოდელია, რომელიც პირველად ცდილობს იმ ეპოქის ძალადობრივი ფიზიკა რეალურად გაითვალისწინოს.

A model of the Hadean, not a memory of it

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



მოდელში შეჯახებით შემოტანილი სითბო ენერგეტიკულ ბალანსში დომინირებს; თხელი, ზედაპირთან ახლოს გამდნარი ქერქი მუდმივად გადამუშავდება; მდგრადი კონტინენტური ქერქი კი მხოლოდ დაახლოებით 4.0–3.9 Ga-ის გარდამავალ პერიოდში ჩნდება. ეს ჰადეურის მოდელია და არა მისი პირდაპირი კვალი.

The Clean Paper CC BY 4.0

რა გააკეთეს ავტორებმა

გუნდმა სამი კომპონენტი გააერთიანა, რომლებიც ხშირად ცალკე განიხილება.

პირველი იყო **სტოქასტური შეჯახებების ნაკადის მოდელი** — ასტეროიდებისა და უფრო დიდი სხეულების წვიმა, რომელიც ჰადეურსა და ადრეულ არქეულში შიდა მზის სისტემას ურტყამდა. მნიშვნელოვანია, რომ ეს ძველი „გვიანი მძიმე ბომბარდირების“ ერთი პიკი არ არის. ნაკადი ადრეულ პერიოდში ინტენსიურია და **დროთა განმავლობაში კლებულობს**, ხოლო დიდი შეჯახებები შემთხვევითად ხდება და არა წინასწარ განსაზღვრული გრაფიკით. მოდელი მთვარისა და შიდა მზის სისტემის შეჯახებათა სტატისტიკიდანაა გადამუშავებული და ცირკონის ასაკების განაწილებასა და არსებულ პალეომაგნიტურ მტკიცებულებასთან თავსებადაა შერჩეული.

მეორე იყო **გეოდინამიკური სიმულაციები**, რომლებიც ქერქსა და ზედა მანტიაში სითბოს გადატანას აღწერს. გამოიყენეს საკონტროლოდ შედარებული lattice-Boltzmann-ის კოდი Planet_LB, როგორც მარტივი ერთგანზომილებიანი ტემპერატურა-სიღრმის პროფილებისთვის, ისე 4.1 Ga-ის მანტიის სრული ორგანზომილებიანი კონვექციის

სურათებისთვის. მოდელები მოიცავს ჩვეულებრივ შიდა სითბოს წყაროებს — რადიოაქტიურ დაშლასა და ბირთვიდან წამოსულ სითბოს — და განსაკუთრებით **მაგმურ ადვექციას**: ალმავალი ნადნობის მიერ ზემოთ ატანილ სითბოს, რომელსაც ქერქის თერმული მოდელები ხშირად გამოტოვებს.

მესამე იყო ადრეული ქერქისთვის რეალისტური **ფაზური წონასწორობის მოდელირება** — Nuvvuagittuq greenstone belt-ის ჰიდრატირებული ჰადეური მეტაბაზალტის მაგალითზე — რათა დაედგინათ, რა ტემპერატურასა და სიღრმეზე დაიწყებდა ასეთი ქანი დნობას.

ერთი მეთოდოლოგიური არჩევანი მთელი ნაშრომის წაკითხვას განსაზღვრავს: ავტორებმა შეგნებულად აირჩიეს დაშვებები, რომლებიც **მათივე დასკვნის წინააღმდეგ მუშაობს**. გამოიყენეს „არაქონდრიტული“ მანტია — ნაკლები სითბოს წარმომქმნელი რადიოაქტიური ნივთიერებით, ვიდრე სტანდარტულ ქონდრიტულ მოდელში, და შიდა გათბობის ნახევარზე ნაკლებით — ასევე კონსერვატიული გათბობის სიჩქარეები; საერთოდ გამოტოვეს ახალგაზრდა, ახლომდებარე მთვარის მოქცევითი გათბობაც. ამიტომ მიღებული ქერქის ტემპერატურები **ქვედა ზღვრის შეფასებებია**. რეალური ჰადეური, თუ განსხვავებული იყო, უფრო ცხელი შეიძლებოდა ყოფილიყო.

რა აღმოაჩინეს

ჰადეურის ენერგეტიკულ ბალანსში შეჯახებები დომინირებდა და არა შიდა სითბო. შეჯახებებით შემოტანილი სითბოს დროში ინტეგრირებისას იგი ჰადეურის უმეტეს ნაწილში შიდა წყაროების წვლილს სულ მცირე ერთი რიგის სიდიდით აჭარბებს. ამ სურათში ადრეული ტექტონიკური აქტივობის მთავარი მამოძრავებელი შეჯახებებით გათბობაა და არა რადიოაქტიური დაშლა; მისი როლი მხოლოდ დაახლოებით **3.9 Ga-ის შემდეგ** მცირდება.

ეს სითბო ქერქს თხელს ტოვებდა და მცირე სიღრმეზე ადნობდა. შეჯახებებისა და მაგმური ადვექციის გარეშე მოდელი ჰადეურ ქერქში ნაწილობრივ დნობას მხოლოდ დაახლოებით 10–15 კმ-ის სიღრმის ქვემოთ იძლევა. შეჯახებით გათბობის დამატებისას დნობის ზონა მკვეთრად ზემოთ იწევს: ქერქი ნაწილობრივ გამდნარია ზედაპირიდან მხოლოდ **რამდენიმე კილომეტრის** ქვემოთ — დაახლოებით 2–5 კმ-ზე. დაახლოებით 5 კმ-ის სიღრმეზე მოდელები >30% ნადნობ მასას პროგნოზირებს — მდგომარეობას, სადაც ქანი მყარი ფილის სახით თავს ველარ ინარჩუნებს. 5–10 კმ-ზე ~1000–1100°C ტემპერატურა ქერქს შემადგენლობის მიუხედავად მნიშვნელოვნად ადნობს. დარჩენილი მყარი ქერქი **ძალიან თხელი, ~5 კმ-ზე ნაკლები** იქნებოდა.

ნახევრად გამდნარი ქერქი საკუთარ კვალს შლის. ფართო დნობა მკვრივ, რკინითა და მაგნიუმით მდიდარ მასალას ჩაძირვისა და გამოყოფის საშუალებას აძლევს, ხოლო მსუბუქი, სილიციუმით მდიდარი ნადნობი ზემოთ ამოდის. დროთა განმავლობაში საშუალო ქერქი უფრო განვითარებული, სილიციუმით მდიდარი შემადგენლობისკენ მიდის და ქმნის ფელსიკურ ნადნობს, რომელშიც ცირკონი შეიძლება დაკრისტალდეს. ამ თხელი ქერქის თითქმის მთელი ნაწილი შემდეგ კონვექტირებად მანტიაში გადამუშავდებოდა — რაც ქიმიურ და იზოტოპურ ჩანაწერს

ეთანხმება. მოდელში ჰადეური ქანების თითქმის სრული არარსებობა არქივის შემთხვევითი ხარვეზი კი არა, **პროგნოზია**. 4.2 Ga-ის ქანები და 4.4 Ga-ის ცირკონები მხოლოდ იშვიათი გადარჩენილი ნაწილებია ქერქისა, რომელიც წარმოიქმნებოდა და თითქმის მაშინვე ნადგურდებოდა.

ბომბარდირების დასასრული პირველი მდგრადი კონტინენტების პერიოდს ემთხვევა. როცა ბომბარდირება 4.0–3.9 Ga-ის გარდამავალ პერიოდში კლებულობს, ქერქს გასქელება და გადარჩენა შეუძლია. უძველესი შემორჩენილი კონტინენტური ქანებიც დაახლოებით ამავე პერიოდში ჩნდება. ავტორების ფრთხილი ფორმულირებაა: მდგრადი კონტინენტური ქერქის ამ დროს გამოჩენა „სავარაუდოდ შემთხვევითი დამთხვევა არ არის“.

მათი მთავარი დასკვნაა: ასეთ პირობებში — თხელი ქერქი, რომელიც რამდენიმე კილომეტრის სიღრმეზე უკვე ნაწილობრივ გამდნარია — **ჰადეურში ფილების ტექტონიკა ნაკლებად სავარაუდო ჩანს.**

ისინი იმასაც აჩვენებენ, რატომ მივიდა ზოგი ადრინდელი ნაშრომი საპირისპირო დასკვნამდე. სტოქასტური შეჯახებების წინა კვლევები ნებისმიერ მომენტში ქერქის <2.5%-ის დნობას იღებდა და შეჯახებებს მცირე ეფექტს ანიჭებდა. ამ ნაშრომებში ორი რამ არ იყო გათვალისწინებული: დიდი შეჯახებების გლობალური გავლენა ღრმა მანტიის დნობაზე და აღმავალი მაგმის მიერ სითბოს ზემოთ გადატანა. ამ ორი ეფექტის დაბრუნებით თერმული სურათი რადიკალურად იცვლება.

რატომ არ არის მოდელი იგივე, რაც კვალი

ზემოთ აღწერილი ყველაფერი სიმულაციის შედეგია და არა ჰადეური ქანებიდან აღებული გაზომვა — იმიტომ, რომ ასეთი ქანები თითქმის მთლიანად აღარ არსებობს. ეს შედეგს ავტომატურად სუსტს არ ხდის, მაგრამ ზუსტად განსაზღვრავს, **რა ტიპის შედეგია.**

ჯაჭვი ასეთია: შეჯახებების ნაკადის *მოდელი* → მანტია/ქერქში სითბოს გადატანის *მოდელი* → კონკრეტული ქანის დნობის *მოდელი*. თითოეული რგოლი ფიზიკურად მოტივირებულია და, სადაც შესაძლებელია, საკონტროლო მონაცემებთანაა შედარებული; მაგრამ მთლიანობაში ეს თანმიმდევრული არგუმენტია იმის შესახებ, **როგორი უნდა ყოფილიყო ჰადეური სარწმუნო ფიზიკის პირობებში**, და არა პირდაპირი გაზომვა იმისა, როგორი *იყო* იგი სინამდვილეში.

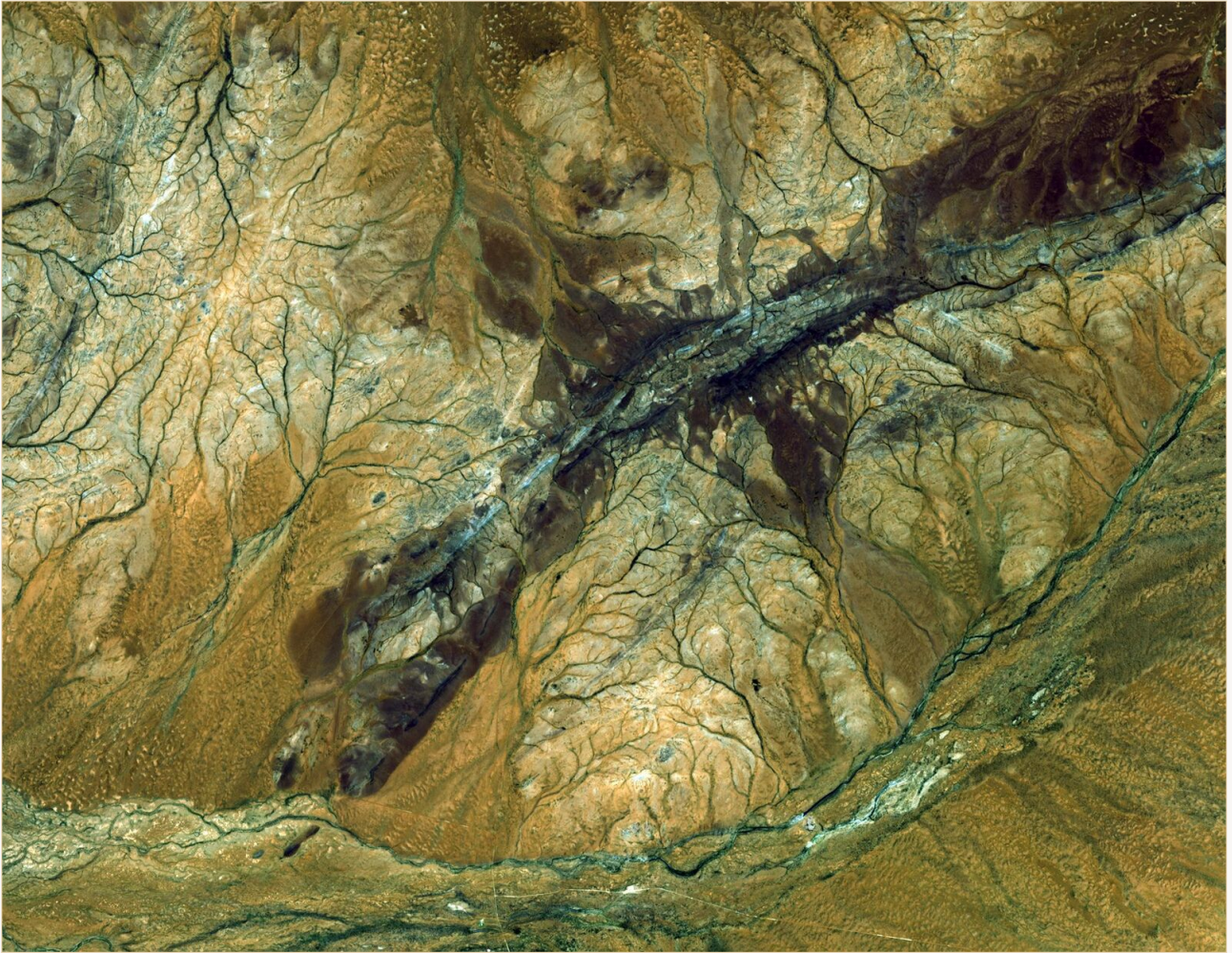
ამიტომ ავტორების კონსერვატიული დაშვებები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია. გათბობის ქვედა შეფასებითაც მცირე სიღრმის ქერქი ფართოდ გამდნარი გამოდის, ამიტომ ხარისხობრივი დასკვნა — ჰადეური ქერქი ცხელი და სუსტი იყო — დაშვებების ცვლილების მიმართ შედარებით მდგრადია. რაც აქ ზუსტად **არ** ფიქსირდება, არის კონკრეტული რიცხვები: ზუსტი გეოთერმული პროფილები, დნობის წილები და ქერქის სისქე. მიმართულება ძლიერად უნდა წავიკითხოთ, ათწილადის სიზუსტე კი — წინასწარ შეფასებად.

რას არ ამტკიცებს ეს

- ნაშრომი **პირდაპირ არ აკვირდება ჰადეურ ქერქს**. ამ ეპოქიდან ქანი თითქმის არ არსებობს; შედეგი ფიზიკური შედეგების მოდელირებაა და არა გაზომვა.
- ის **გვიანი მძიმე ბომბარდირების ერთ პიკზე არ დგას**. გამოყენებული შეჯახებების ნაკადი თანდათან კლებულობს და სტოქასტურია — მოულოდნელი ერთჯერადი პიკი მოდელს არც სჭირდება და არც იყენებს.
- ის **ფილების ტექტონიკის დებატს არ ხურავს**. „ნაკლებად სავარაუდო“ აქ ფიზიკურად დასაბუთებული დასკვნაა ცხელი, რბილი ადრეული დედამიწის სასარგებლოდ, მაგრამ ჰადეურის ტექტონიკური რეჟიმი კვლავ სადავოა.
- ის **არ ამტკიცებს მიზეზობრივ კავშირს**, რომ შეჯახებების შემცირებამ გამოიწვია კონტინენტების გამოჩენა 4.0–3.9 Ga-ზე. დროითი დამთხვევა ძლიერი ასოციაციაა, რომელსაც ავტორები „სავარაუდოდ არა შემთხვევით“ უწოდებენ — დამაჯერებელი კორელაცია, მაგრამ არა დადასტურებული მიზეზი.
- ჯეკ-ჰილსის ცირკონები **შემორჩენილი კონტინენტები არ არის**. ისინი ადრეული ფელსიკური მასალისა და წყლის იშვიათი შემორჩენილი მარცვლებია; მოდელის აზრი ისაა, რომ მათ წარმოქმნილი ქერქის უმეტესობა მოგვიანებით გადამუშავდა.
- ის **ადრეული დედამიწის სრულ ისტორიას არ აღადგენს**. სიმულაციები გამარტივებულია — ერთგანზომილებიანი პროფილები და ორგანზომილებიანი ეკვატორული ჭრილები, ეკვატორთან შეზღუდული შეჯახებები და დროის ცალკეული კადრები — და არა პლანეტის სრული ოთხგანზომილებიანი მოდელი.

რამდენად ძლიერია მტკიცებულება?

ცენტრალური მტკიცებისთვის — რომ შეჯახებებით გათბობა ჰადეური ქერქის პირველი რიგის განმსაზღვრელი იყო და მას თხელ, მცირე სიღრმეზე გამდნარ მდგომარეობაში ინარჩუნებდა — არგუმენტი თანმიმდევრული და მნიშვნელოვანი თვალსაზრისით კონსერვატიულია. გამოიყენება საკონტროლოდ შემოწმებული გეოდინამიკური კოდი, ფიზიკურად გონივრული საწყისი მონაცემები, ქვედა ზღვრის დაშვებები და სითბოს წყარო, რომელსაც წინა მოდელები ხშირად საერთოდ არ ითვალისწინებდა. მოდელი ერთდროულად ორ ჯიუტ ფაქტსაც ხსნის: რატომ თითქმის არ გადარჩა >4 Ga-ის ქანი — თითქმის სრული გადამუშავების გამო — და რატომ ჩნდება მდგრადი ქერქი ბომბარდირების კლებისას.



დასავლეთ ავსტრალიის ჯეკ-ჰილსი NASA ASTER-ის ხედით. ამ რეგიონიდან მიღებული ცირკონები დედამიწის ადრეული ქერქის უძველეს შემორჩენილ მასალას მოიცავს — პატარა მინიშნებებს ეოლიდან, რომლის ქანები თითქმის მთლიანად წაიშალა.

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

შეზღუდვებიც თანაბრად ნათელია და ღრმა დროის მოდელისთვის ბუნებრივია: მოდელები სხვა მოდელებზეა აგებული, გეოლოგიური ჩანაწერი უკიდურესად მწირია, ხოლო ყველაზე ციტირებადი დასკვნა — „ფილების ტექტონიკა ნაკლებად სავარაუდო“ — დასკვნაა და არა დაკვირვება. სწორი პოზიციაა ეს მივიღოთ ძლიერ, კარგად დასაბუთებულ ჰიპოთეზად, რომელიც ჰადეურის შესახებ ჩარჩოს ცვლის და სხვებს მისი დაშვებების — განსაკუთრებით შეჯახებების ნაკადის მოდელის — შემოწმების საშუალებას აძლევს, და არა როგორც საბოლოოდ დახურულ საკითხს.

ყველაზე სასარგებლო შეჯამება არც „ჰადეური ზუსტად ასეთი იყო“ არის და არც „ეს უბრალოდ სიმულაციაა“. უფრო ზუსტად: სარწმუნო, კონსერვატიული ფიზიკის პირობებში ძლიერად დაბომბილ ადრეულ დედამიწას თხელი, ნახევრად გამდნარი, მუდმივად გადამუშავებადი ქერქი ექნებოდა — და ეს ერთი იდეა იმ მცირეოდენი მტკიცებულებების საოცრად დიდ ნაწილს ხსნის, რომელიც რეალურად გვაქვს.

რატომ არის მნიშვნელოვანი

ადრეული დედამიწის პოპულარული სურათი ორ უკიდურესობას შორის ირხევა: მშვიდი, ფილების ტექტონიკით მოქმედი წყლიანი სამყარო, თითქმის დღევანდელის მსგავსი, ან ჯოჯოხეთურად ცხელი ლავის პლანეტა. ეს ნაშრომი კონკრეტულ, ფიზიკურად მოტივირებულ შუა სურათს გვთავაზობს: თხელი ქერქი, რომელიც ზედაპირიდან რამდენიმე კილომეტრში განმეორებით დნება, მუდმივად ინგრევა და ახლიდან იქმნება, ხოლო პირობებს შეჯახებები განსაზღვრავს და არა მხოლოდ შიდა სითბო.

ეს ახალი ჩარჩო რეალურ საქმეს აკეთებს. იგი ერთ მექანიზმს სთავაზობს დედამიწის ადრეული ისტორიის ორ დიდ ფაქტს — გეოლოგიური ჩანაწერის თითქმის სრულ არარსებობას და პირველი მდგრადი კონტინენტების დროით გამოჩენას — და ამბის ცენტრში აყენებს ხშირად გამოტოვებულ პროცესს, შეჯახებებით გათბობას. თუ იდეა შემდგომ შემოწმებებს გაუძლებს, შეიძლება შეცვალოს ჩვენი წარმოდგენა იმაზე, როდის იქცა დედამიწა სტაბილური კონტინენტების პლანეტად, და დაეხმაროს სხვა კლდოვანი სამყაროების გააზრებასაც, რომლებიც საკუთარი ბომბარდირების ისტორიის პირობებში ჩამოყალიბდნენ.

ამისთვის მოდელს ბოლო სიტყვა არ სჭირდება. საკმარისია კარგი, შემოწმებადი ჰიპოთეზა იყოს — და შემორჩენილ ცირკონისა და იზოტოპურ ჩანაწერთან კავშირით სწორედ ასეთია. „დამალული ჰადეური“ ზუსტად ამას ნიშნავს: ეპოქას, რომელსაც ძირითადად მოდელირებით ვწვდებით, რადგან მან საკუთარი მტკიცებულების დიდი ნაწილი თვითონ წაშალა.

მოკლე შეჯამება

დედამიწის პირველი ეონი, ჰადეური (~4.03 Ga-მდე), თითქმის არ ტოვებს გეოლოგიურ ჩანაწერს. ეს მოდელური კვლევა კითხულობს, როგორი იქნებოდა ქერქი, თუ გავითვალისწინებთ სითბოს წყაროს, რომელსაც ხშირად გამოტოვებენ: შეჯახებებს. სტოქასტური, თანდათან კლებადი შეჯახებების ნაკადის მოდელისა და საკონტროლოდ შემოწმებული ერთ- და ორგანზომილებიანი ქერქ-მანტიის სითბოს გადატანის სიმულაციების მიხედვით — აღმავალი ნადნობის მიერ სითბოს ტრანსპორტის ჩათვლით — დროში დაგროვილი შეჯახებების სითბო ჰადეურის უმეტესობაში დედამიწის მთელ შიდა სითბოს სულ მცირე ერთი რიგის სიდიდით აჭარბებდა. შედეგად მიიღება თხელი ქერქი (<~5 კმ), რომელიც ზედაპირიდან რამდენიმე კილომეტრში უკვე ნაწილობრივ გამდნარია და ~5 კმ-ის სიღრმეზე >30% ნადნობს შეიცავს — ავტორების აზრით იმდენად სუსტი, რომ ფილების ტექტონიკა ნაკლებად სავარაუდო ხდება. ასეთი ქერქის უმეტესობა მანტიაში გადამუშავდებოდა, რაც ჰადეური მასალის სიმცირეს ხსნის; შეჯახებების კლებასთან ერთად, 4.0–3.9 Ga-ის გარდამავალ პერიოდში, მდგრადი კონტინენტური ქერქის ფორმირება შესაძლებელი ხდება, ზუსტად იმ დროს, როცა უძველესი შემორჩენილი ფელსიკური ქანები ჩნდება — ავტორების სიტყვებით, „სავარაუდოდ არა შემთხვევით“. რადგან ავტორები განზრახ კონსერვატიულ, გათბობის ქვედა შეფასებებს იყენებენ, ხარისხობრივი შედეგი შედარებით მდგრადია, თუმცა ზუსტი რიცხვები არა. ეს

დედამიწის ადრეული ისტორიის ძლიერი, თანმიმდევრული მოდელია — არა პირდაპირი დაკვირვება.

ზედმეტი ხმაურის გარეშე

რას აჩვენებს ნაშრომი: ფიზიკურად დასაბუთებულ სიმულაციებში, სადაც შეჯახებებით გათბობა და მაგმური სითბოს გადატანა შედის, ჰადეური ქერქი თხელი და ზედაპირთან ახლოს ნაწილობრივ გამდნარი გამოდის; ენერგეტიკულ ბალანსში შეჯახებები შიდა სითბოზე მეტად დომინირებს; ქერქის უმეტესობა მანტიაში გადამუშავდება და მოდელის პირობებში ფილების ტექტონიკა თავს ვერ ინარჩუნებს.

რა არის სარწმუნო, მაგრამ დაუმტკიცებელი: რომ შეჯახებები იყო ერთ-ერთი მიზეზი, რის გამოც მდგრადი კონტინენტები ~3.9 Ga-ზე ჩნდება; რომ ჰადეური უფრო რბილი/სტაგნაციური საფარის სამყარო იყო და არა ადრეული ფილების ტექტონიკის რეჟიმი; და რომ ჰადეური ქანების თითქმის სრული გაქრობა სწორედ გამდნარი ქერქის გადამუშავებამ გამოიწვია.

რას არ აჩვენებს: ჰადეური ქერქის პირდაპირ გაზომვას; საბოლოო პასუხს ფილების ტექტონიკის დებატზე; დადასტურებულ მიზეზობრივ კავშირს ბომბარდირების კლებასა და პირველ კონტინენტებს შორის; იმას, რომ ჯექ-ჰილსის ცირკონები შემორჩენილი კონტინენტებია; ან ადრეული პლანეტის სრულ მოდელს.

მთავარი შეზღუდვები: ჰადეურის გეოლოგიური ჩანაწერი თითქმის არ არსებობს, ამიტომ შედეგი ძალიან მცირე პირდაპირი მონაცემით შეზღუდული მოდელია; მოდელი რამდენიმე საფეხურს აერთიანებს (შეჯახებების ნაკადი → გეოდინამიკა → ფაზური წონასწორობა); თავად შეჯახებების ნაკადიც წარმომადგენლობითი, მაგრამ გაურკვეველი არჩევანია; სიმულაციები გამარტივებულია (1D და 2D ეკვატორული ჭრილები, დროის ცალკეული კადრები). კონსერვატიული ქვედა ზღვრის დაშვებები ხარისხობრივ დასკვნას ამყარებს, მაგრამ ზუსტ გეოთერმულ პროფილებს ზუსტს არ ხდის.

რამდენად უნდა ენდოს ამას ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა იმისა, რომ სარწმუნო ფიზიკის პირობებში ძლიერად დაბობილ ადრეულ დედამიწას ცხელი, თხელი და მცირე სიღრმეზე გამდნარი ქერქი ექნებოდა. საშუალო — რომ ეს ჰადეურში ფილების ტექტონიკას ნაკლებად სავარაუდოს ხდის და დაკარგულ გეოლოგიურ ჩანაწერს ხსნის. დაბალი ნებისმიერ მტკიცებაზე, თითქმის მოდელი **ამტკიცებს**, ზუსტად როგორც ან როდის ჩამოყალიბდა კონტინენტები. ეს ძლიერი, კონსერვატიული მოდელია, რომელიც ჰადეურს ახლებურად გვაჩვენებს და არა მასში პირდაპირი ფანჯარა.

წყაროები

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