The Clean Paper

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

Բարակ, կիսահալված առաջին կեղև. մոդել, որտեղ Hadean-ը վարում էին հարվածները, ոչ ներքին ջերմությունը

Երկրի Hadean eon-ը գրեթե rock record չի թողել: Այս modelling study-ն stochastic declining impact-flux model-ը համադրում է crust/mantle heat-flow simulations-ի հետ և գտնում, որ impacts-ի heat-ը Hadean-ի մեծ մասում Երկրի internal heat-ը գերազանցել է առնվազն order of magnitude-ով՝ թողնելով <~5 km thin crust, որը few km depth-ում partially molten էր և authors-ի inference-ով plate tectonics-ի համար չափազանց weak: Սա strong conservative model է, ոչ 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

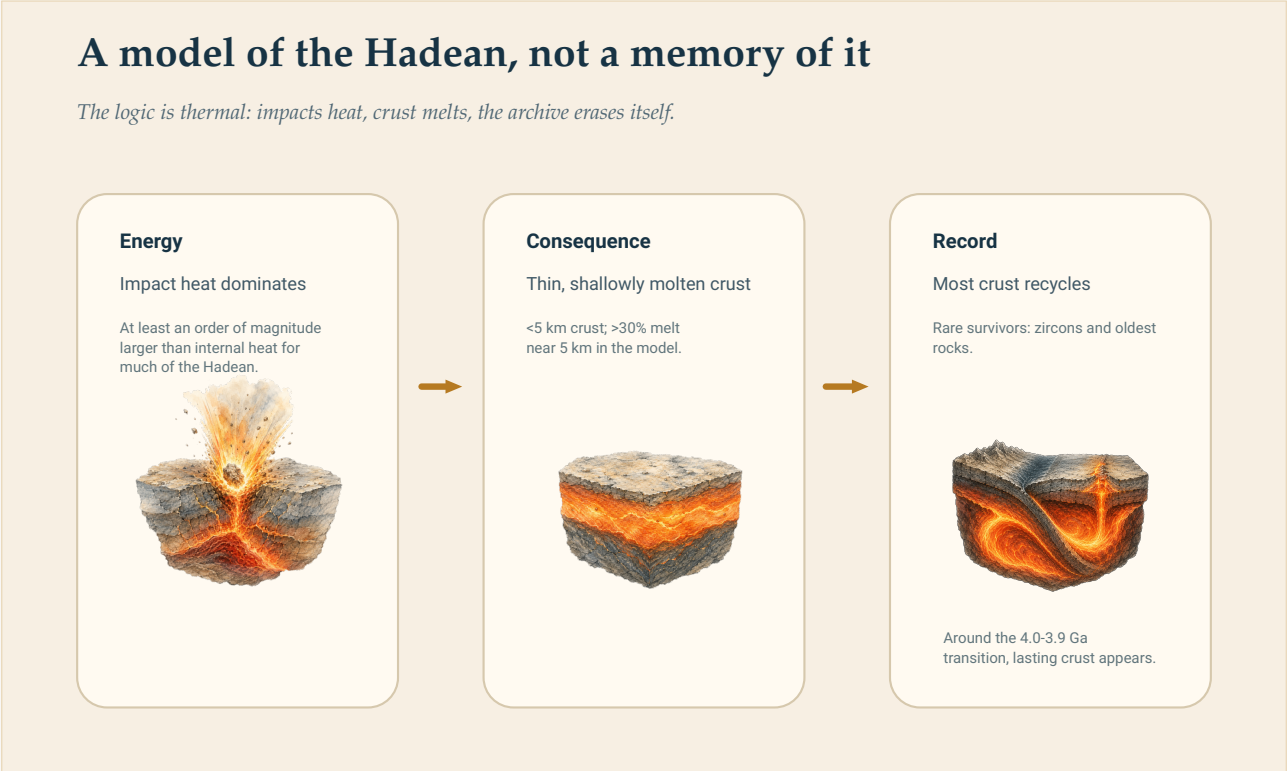
Երկրի պատմության այն գլուխը, որից գրեթե ոչ մի էջ չի մնացել

Երկիրը մեզ հայտնի միակ մոլորակն է, որն ունի մայրցամաքներ՝ թեթև, սիլիցիումով հարուստ ցամաքային զանգվածներ, որոնց վրա ապրում ենք մենք: Բայց այն հարցը, թե ինչպես են առաջին մայրցամաքները ձևավորվել, երկրաբանության ամենահին չլուծված խնդիրներից է: Պատճառը դաժանորեն պարզ է. ապացույցների գրեթե ամբողջ մասը կորել է:

Երկրի առաջին էոնը՝ Հադեյանը, տևում է մոլորակի ծնունդից մինչև մոտ 4,03 միլիարդ տարի առաջ (Ga): Այդ առաջին կես միլիարդ տարուց գրեթե ոչինչ չի պահպանվել: Ամենահին ամբողջական ֆելզիկ՝ մայրցամաքային տիպի ապարները մոտ 4,03 Ga հին են: Մի քանի հազվադեպ բազալտային ապար հասնում է մոտ 4,2 Ga-ի: Իսկ մեզ հայտնի ամենահին նյութը ցիրկոնի բյուրեղների փոքր հավաքածուն է, որոնցից ամենահայտնիները Արևմտյան Ավստրալիայի Jack Hills-ից են և թվագրվում են մինչև 4,4 Ga: Սա է Երկրի մանկության ամբողջ արխիվը՝ մի քանի տեղանք և ավազահատիկի չափի մի քանի հանքանյութ:

Այս ուսումնասիրությունը այդ արխիվին նոր ապար չի ավելացնում: Այն ուրիշ բան է անում. կառուցում է ֆիզիկական մոդել, թե այդ պայմաններում ինչպիսին կարող էր լինել Հադեյանի կեղևը, և տալիս է մի հարց, որը վաղ Երկրի շատ մոդելներ շրջանցում են: Ի՞նչ է փոխվում, երբ այլևս չենք անտեսում այն փաստը, որ վաղ Երկիրը շարունակ ռմբակոծվում էր տիեզերական մարմիններով:

Հեղինակների պատասխանը ուշագրավ է: Ըստ մոդելի՝ Հադեյանի մեծ մասում հարվածներից ստացվող ջերմությունը գերազանցել է Երկրի ներքին ջերմության բոլոր աղբյուրները միասին: Կեղևը մնացել է բարակ և մասամբ հալված՝ այնքան թույլ, որ հեղինակների կարծիքով ժամանակակից սալերի տեկտոնիկային նման համակարգ չէր կարող կայուն գործել: Սա մոդել է, ոչ անցյալի անմիջական հիշողություն: Բայց այն գոնե փորձում է հաշվի առնել այն դաժան միջավայրը, որի մասին խոսում է:



Մոդելում հարվածային ջերմությունը գերիշխում է էներգետիկ հաշվեկշռում, բարակ և մակերեսին մոտ մասամբ հալված կեղևը շարունակ վերամշակվում է, իսկ երկարատև մայրցամաքային կեղևը հայտնվում է միայն մոտ 4,0–3,9 Ga անցման շրջանում: Սա Հադեյանի մոդել է, ոչ նրա ուղղակի «հիշողություն»:

The Clean Paper CC BY 4.0

Ի՞նչ արեցին հեղինակները

Թիմը միավորել է երեք բաղադրիչ, որոնք սովորաբար ուսումնասիրվում են առանձին:

Առաջինը **հարվածների հոսքի ստոխաստիկ մոդելն** է՝ աստերոիդների և ավելի խոշոր մարմինների հոսքը, որոնք Հադեյանի և վաղ Արխեյանի ընթացքում բախվել են ներքին Արեգակնային համակարգի մոլորակներին: Կարևոր է, որ սա հին «Ուշ ծանր ռմբակոծման» մեկ կտրուկ գագաթնակետի գաղափարը չէ: Հոսքը սկզբում մեծ է և **ժամանակի ընթացքում նվազում է**, իսկ խոշոր հարվածները տեղի են ունենում պատահականորեն, ոչ պարբերական ժամանակացույցով: Մոդելը վերամասշտաբվել է Լուսնի և ներքին Արեգակնային համակարգի հարվածային վիճակագրությունից և ընտրվել այնպես, որ չհակասի ցիրկոնների տարիքային բաշխումներին ու առկա պալեոմագնիսական տվյալներին:

Երկրորդը **գեոդինամիկական սիմուլյացիաներն** են, որոնք նկարագրում են, թե ինչպես է ջերմությունը շարժվում կեղևով և վերին մանտիայով: Հեղինակներն օգտագործել են ստուգված lattice-Boltzmann Planet_LB կոդը՝ և՛ պարզ միաչափ ջերմաստիճանխորություն հաշվարկների, և՛ 4,1 Ga ժամանակի մանտիայի երկչափ

կոնվեկցիոն պատկերների համար։ Մոդելներում ներառվել են սովորական ներքին ջերմային աղբյուրները՝ ռադիոակտիվ քայքայումը և միջուկից եկող ջերմությունը, ինչպես նաև մի գործոն, որը կեղևի շատ ջերմային մոդելներ բաց են թողնում՝ **մագմատիկ ադվեկցիան**, այսինքն՝ բարձրացող հալոցքի միջոցով դեպի վեր տեղափոխվող ջերմությունը։

Երրորդը վաղ կեղևի իրատեսական կազմի **փուլային հավասարակշռության մոդելավորումն** է։ Հեղինակները որպես օրինակ վերցրել են Nuvvuagittuq կանաչքարային գոտու ջրով հարուստ հադեյան մետաբազալտ և հաշվարկել, թե ինչ ջերմաստիճանի ու խորության դեպքում այդպիսի ապարը կսկսեր հալվել։

Մեկ մեթոդաբանական ընտրություն կարևոր է ամբողջ հոդվածը ճիշտ կարդալու համար. հեղինակները միտումնավոր ընտրել են ենթադրություններ, որոնք իրենց եզրակացությունը *թուլացնում են*, ոչ ուժեղացնում։ Նրանք ընդունել են «ոչ քոնդրիտային» մանտիա՝ ստանդարտ քոնդրիտային մոդելից ավելի քիչ ջերմություն արտադրող ռադիոակտիվ տարրերով, կիրառել են պահպանողական տաքացման արագություններ և անտեսել երիտասարդ, մոտ գտնվող Լուսնից առաջացող մակընթացային տաքացումը։ Այսինքն՝ հաշվարկված ջերմաստիճանները **ստորին սահմաններ** են։ Եթե ինչոր բան, իրական Հադեյանը կարող էր ավելի տաք լինել։

Ի՞նչ գտան

Հադեյանի էներգետիկ հաշվեկշռում գերիշխել են հարվածները, ոչ Երկրի ներքին ջերմությունը։ Երբ հարվածային ջերմությունը գումարվում է ժամանակի ընթացքում, Հադեյանի մեծ մասում այն ներքին ջերմության ներդրումը գերազանցում է առնվազն մեկ կարգով։ Այս պատկերում վաղ տեկտոնիկ գործընթացների հիմնական էներգետիկ շարժիչը հարվածային տաքացումն է, ոչ ռադիոակտիվ քայքայումը, և դրա դերը փոքրանում է միայն մոտ **3,9 Ga-ից** հետո։

Այդ ջերմությունը կեղևը պահել է բարակ և մակերեսին մոտ մասամբ հալված։ Առանց հարվածային ջերմության և հալոցքի միջոցով ջերմափոխադրման՝ մոդելում Հադեյանի կեղևը մասամբ հալվում է միայն մոտ 10–15 կմ խորությունից ներքև։ Երբ հարվածային ջերմությունը ներառվում է, հալման գոտին կտրուկ բարձրանում է. մասնակի հալումը սկսվում է արդեն մոտ **2–5 կմ** խորության վրա։ Մոտ 5 կմ խորության վրա մոդելը կանխատեսում է ավելի քան 30% հալոցք, որի դեպքում ապարը չափազանց թույլ է կոշտ տեկտոնական սալ պահելու համար։ 5–10 կմ խորության վրա մոտ 1000–1100°C ջերմաստիճանները նշանակում են լայնածավալ հալում գրեթե անկախ ապարի ճշգրիտ կազմից։ Պահպանվող պինդ կեղևը հավանաբար եղել է **բարակ՝ մոտ 5 կմից պակաս**։

Կիսահալված կեղևը ինքն իրեն ջնջում է։ Լայնածավալ հալման ժամանակ երկաթով և մագնեզիումով հարուստ ավելի խիտ նյութը կարող է ներքև սուզվել և առանձնանալ, մինչ ավելի թեթև՝ սիլիցիումով հարուստ հալոցքները բարձրանում են։ Ժամանակի ընթացքում սա կեղևի միջին կազմը մղում է ավելի զարգացած,

սիլիցիումով հարուստ ուղղությամբ և ստեղծում է ֆելզիկ հալոցքներ, որոնցից կարող է ցիրկոն բյուրեղանալ։ Այդ բարակ կեղևի մեծ մասը հետո վերամշակվում է և վերադառնում կոնվեկցիոն մանտիա, ինչը համատեղելի է պահպանված քիմիական ու իզոտոպային տվյալների հետ։ Այս մոդելում Հադեյանի ապարների գրեթե ամբողջական բացակայությունը տվյալների «դատարկություն» չէ, այլ **կանխատեսում**։ 4,2 Ga ապարներն ու 4,4 Ga ցիրկոնները հազվադեպ վերապրած մնացորդներ են մի կեղևից, որը ձևավորվելուն զուգահեռ հիմնականում ոչնչացվել է։

Ռմբակոծման թուլացումը ժամանակով համընկնում է առաջին կայուն մայրցամաքների հետ։ Երբ 4,0–3,9 Ga անցման շրջանում հարվածների հոսքը նվազում է, կեղևը վերջապես կարող է հաստանալ և երկար պահպանվել։ Ամենահին պահպանված մայրցամաքային ապարները հայտնվում են մոտ նույն ժամանակ։ Հեղինակներն այստեղ զգույշ են ձևակերպում. այն, որ կայուն մայրցամաքային կեղևը հայտնվում է հենց այդ շրջանում, «հավանաբար պատահական համընկնում չէ»։

Նրանց հիմնական եզրակացությունը սա է. այդպիսի պայմաններում՝ մի քանի կիլոմետր խորությունից մասամբ հալված բարակ կեղևով, **Հադեյանում սալերի տեկտոնիկան քիչ հավանական է**։

Հոդվածը նաև բացատրում է, թե ինչու նախկին որոշ աշխատանքներ հակառակ եզրակացության էին հասել։ Ստոխաստիկ հարվածների ավելի վաղ մոդելները գտել էին փոքր ազդեցություն՝ ցանկացած պահի հալված կեղևի բաժինը 2,5%-ից պակաս։ Բայց դրանք բաց էին թողել երկու բան, որոնք այս աշխատանքում ներառված են՝ խոշոր հարվածների գլոբալ ազդեցությունը մանտիայի խորքային հալման վրա և այդ ջերմության վեր բարձրացումը մագմայի հետ։ Երբ երկու գործոնն էլ ավելացվում են, ջերմային պատկերը կտրուկ փոխվում է։

Ինչու մոդելը հիշողություն չէ

Վերևում նկարագրված ամեն ինչ սիմուլյացիաների արդյունք է, ոչ Հադեյանի ապարներից վերցված անմիջական չափում, որովհետև այդ ժամանակաշրջանի ապարները գրեթե ամբողջությամբ վերացել են։ Սա արդյունքը չի դարձնում թույլ, բայց սահմանում է, թե ինչ տեսակի արդյունք է այն։

Պատճառահետևանքային շղթան այսպիսին է. հարվածների հոսքի *մոդելը* սնուցում է մանտիայի և կեղևի ջերմափոխադրման *մոդելը*, որն իր հերթին ստուգվում է կոնկրետ ապարի հալման *մոդելի* դեմ։ Յուրաքանչյուր օղակ ունի ֆիզիկական հիմնավորում և հնարավորության դեպքում ստուգված է, բայց ամբողջ շղթան փաստարկ է այն մասին, թե հավանական ֆիզիկայի պայմաններում ինչպիսի՞ն *պետք է լիներ* Հադեյանը, ոչ ուղղակի չափում այն մասին, թե ինչպիսին *իրականում եղել է*։

Հենց այստեղ են կարևոր դառնում հեղինակների պահպանողական ենթադրությունները։ Նրանք ընտրել են ջերմության ստորին սահմաններ և նույնիսկ այդ դեպքում

ստացել մակերեսին մոտ լայնորեն հալված կեղև։ Այդ պատճառով որակական եզրակացությունը՝ որ Հադեյանի կեղևը տաք ու թույլ էր, բավական կայուն է ենթադրությունների փոփոխության նկատմամբ։ Իսկ այն, ինչ այս աշխատանքը ճշգրիտ չի որոշում, թվերն են՝ կոնկրետ երկրաջերմային պրոֆիլները, հալոցքի ճշգրիտ բաժինները և կեղևի ճշգրիտ հաստությունը։ Արդյունքի ուղղությանը կարելի է ավելի վստահ լինել, քան տասնորդական մանրամասներին։

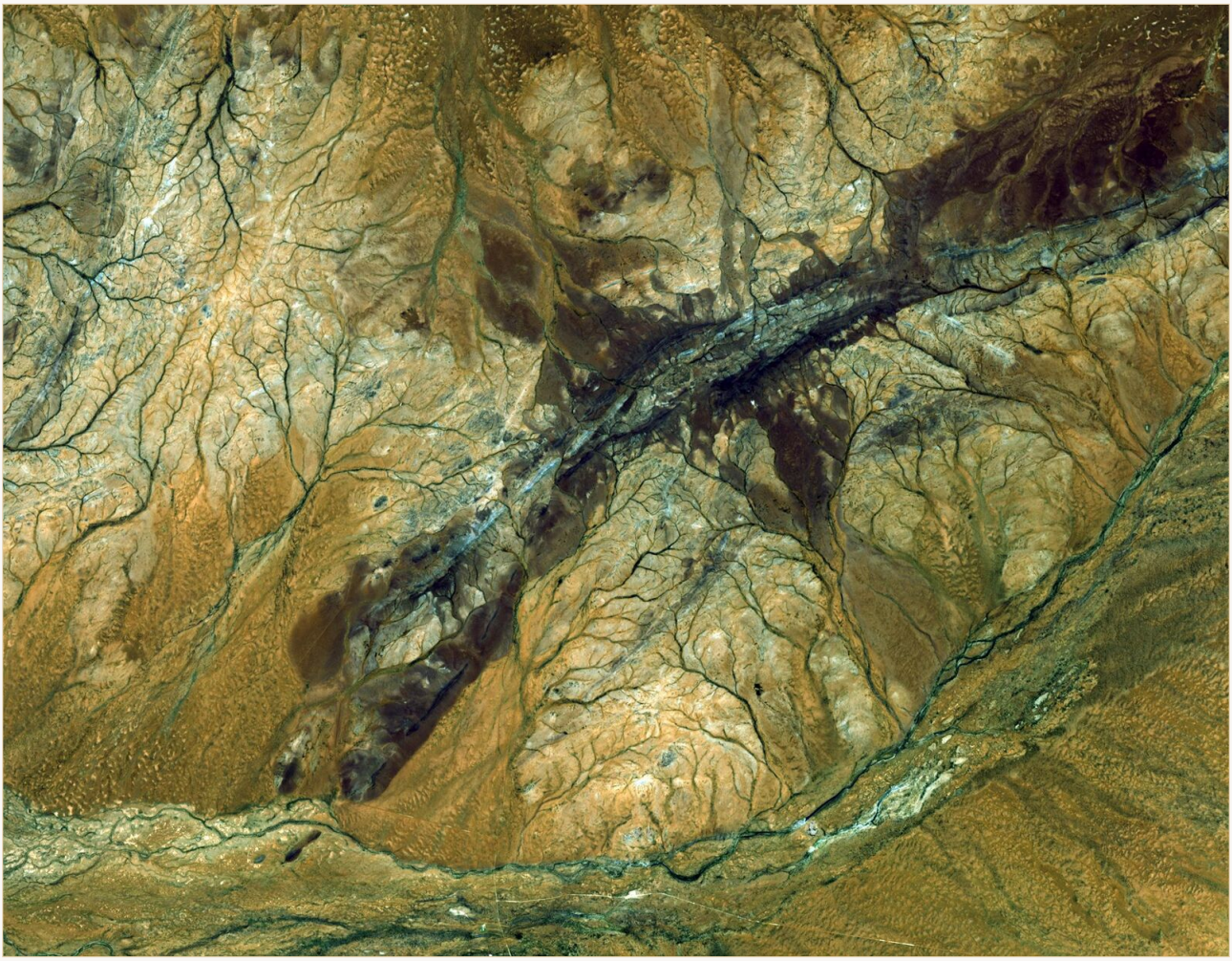
Ի՞նչ սա *չի* ապացուցում

- Սա **ուղղակիորեն չի դիտարկել Հադեյանի կեղևը**։ Այդ դարաշրջանից գրեթե ոչ մի ապար չի պահպանվել. սա ֆիզիկայից ստացվող մոդելային եզրակացություն է, ոչ չափում։
- Սա **չի հիմնվում «Ուշ ծանր ռմբակոծման» վրա**։ Օգտագործված հարվածային հոսքը նվազող և ստոխաստիկ է. հանկարծակի մեկ գագաթնակետ պետք չէ։
- Սա **չի ավարտում սալերի տեկտոնիկայի վերաբերյալ բանավեճը**։ «Քիչ հավանական» եզրակացությունը ուժեղ և ֆիզիկապես հիմնավորված է ու նպաստում է վաղ Երկրի «կանգնած» կամ փափուկ կափարիչի պատկերին, բայց Հադեյանի տեկտոնական ռեժիմը դեռ իրական բանավեճի թեմա է։
- Սա **չի ապացուցում, որ հարվածներն են պատճառել մայրցամաքների հայտնվելը մոտ 4,0–3,9 Ga անցման շրջանում**։ Ժամանակային համընկնումը ուժեղ կապ է, որն հեղինակներն անվանում են «հավանաբար ոչ պատահական», բայց դա դեռ պատճառականության ապացույց չէ։
- Jack Hills-ի ցիրկոնները **պահպանված մայրցամաքներ չեն**։ Դրանք հազվադեպ պահպանված հատիկներ են, որոնք ցույց են տալիս, որ վաղ ժամանակներում ֆելզիկ նյութ ու ջուր գոյություն ունեին։ Մոդելի միտքն այն է, որ այդ նյութը ստեղծած կեղևի մեծ մասը հետո վերամշակվել է։
- Սա **չի վերակառուցում վաղ Երկրի ամբողջական պատմությունը**։ Սիմուլյացիաներն իդեալականացված են՝ միաչափ պրոֆիլներ և երկչափ հասարակածային կտրվածքներ, ժամանակային առանձին պատկերներ, ոչ մոլորակի լիարժեք քառաչափ մոդել։

Որքա՞ն ուժեղ է ապացույցը

Կենտրոնական պնդման համար՝ որ հարվածային տաքացումը Հադեյանի կեղևի վրա առաջնային ազդեցություն է ունեցել և այն պահել է բարակ ու մակերեսին մոտ մասամբ հալված, փաստարկը հետևողական է և մի կարևոր իմաստով պահպանողական։ Այն օգտագործում է ստուգված գեոդինամիկական կոդ, ֆիզիկապես հիմնավորված մուտքային տվյալներ և ստորին սահմանային ենթադրություններ, ինչպես նաև ներառում է ջերմության աղբյուր, որը նախկին շատ մոդելներ պարզապես բաց էին թողնում։ Աշխատանքի վստահելիությունն ուժեղացնում է նաև այն, որ նույն գաղափարով բացատրվում են երկու դժվար փաստ՝ ինչու մոտ 4 Ga-ից հին ապարներ գրեթե չեն պահպանվել և ինչու կայուն կեղևը հայտնվում է մոտավորապես այն

ժամանակ, երբ ռմբակոծումը թուլանում է:



Արևմտյան Ավստրալիայի Jack Hills-ը՝ NASA-ի ASTER գործիքի պատկերում: Այս շրջանի ցիրկոններից մի քանիսը Երկրի վաղ կեղևից պահպանված մեզ հայտնի ամենահին նյութերից են՝ փոքր հուշումներ մի էոնից, որի ապարները գրեթե ամբողջությամբ ջնջվել են:

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

Սահմանափակումներն էլ նույնքան հստակ են և բնորոշ են խոր անցյալի ցանկացած մոդելին. այստեղ մոդելներ են կառուցված այլ մոդելների վրա, իսկ իրական ապարային արխիվը չափազանց սակավ է: Ամենաշատ մեջբերվող եզրակացությունը՝ «սալերի տեկտոնիկան քիչ հավանական է», մոդելային հետևություն է, ոչ դիտարկում: Ճիշտ մոտեցումն այս աշխատանքը դիտելն է որպես ուժեղ, լավ հիմնավորված վարկած, որը նոր շրջանակ է տալիս Հադեյանին և հրավիրում է մյուսներին փորձարկել դրա ենթադրությունները՝ հատկապես հարվածների հոսքի ընտրությունը, ոչ որպես փակված հարց:

Ամենաօգտակար ամփոփումը ոչ «Հադեյանը հենց այսպիսին էր» է, ոչ էլ «սա ընդամենը սիմուլյացիա է»: Ավելի ճիշտ է՝ պահպանողական ու հավանական ֆիզիկայի դեպքում ուժեղ ռմբակոծվող վաղ Երկիրը կունենար բարակ, մասամբ հալված և անընդհատ վերամշակվող կեղև, և այդ մեկ գաղափարը բացատրում է

այն քիչ տվյալների զարմանալի մեծ մասը, որոնք իրականում ունենք։

Ինչո՞ւ է սա կարևոր

Վաղ Երկրի հանրային պատկերը հաճախ տատանվում է երկու ծայրահեղության միջև՝ գրեթե այսօրվա նման խաղաղ, սալերի տեկտոնիկայով ջրային աշխարհ կամ դժոխային լավային մոլորակ։ Այս աշխատանքն առաջարկում է ֆիզիկապես հիմնավորված միջին տարբերակ՝ բարակ կեղև, որը մի քանի կիլոմետր խորությունից շարունակ մասամբ հալվում է, ոչնչացվում և նորից ձևավորվում, իսկ պայմանները մեծ մասամբ որոշում են հարվածները, ոչ ներքին ջերմությունը։

Այս վերաձևակերպումը իրական բացատրական արժեք ունի։ Այն մեկ մեխանիզմով կապում է Երկրի մանկության երկու խոշոր փաստ՝ գրեթե բացակայող ապարային արխիվը և առաջին երկարատև մայրցամաքների հայտնվելու ժամանակը, և պատմության կենտրոն է բերում սովորաբար անտեսված գործընթացը՝ հարվածային տաքացումը։ Եթե արդյունքը դիմանա հետագա ստուգումներին, այն կփոխի մեր պատկերացումները այն մասին, թե երբ Երկիրը դարձավ կայուն մայրցամաքներով մոլորակ, և կարող է կիրառելի լինել նաև այլ քարքարոտ աշխարհների համար, որոնք ձևավորվել են իրենց սեփական ռմբակոծումների պայմաններում։

Դրա համար պարտադիր չէ, որ մոդելը լինի վերջին խոսքը։ Բավական է, որ այն լինի բավական լավ վարկած՝ ստուգելու համար, և որ կապ ունենա պահպանված ցիրկոնային ու իզոտոպային տվյալների հետ։ Վերնագրի «թաքնված Հադեյանը» հենց սա է նշանակում՝ դարաշրջան, որին հիմնականում կարող ենք հասնել միայն մոդելավորմամբ, որովհետև այն ինքն է ջնջել իր ապացույցները։

Կարճ ամփոփում

Երկրի առաջին էոնը՝ Հադեյանը (մինչև մոտ 4,03 Ga), գրեթե ոչ մի ապարային արխիվ չի թողել։ Այս մոդելային ուսումնասիրությունը հարցնում է, թե ինչպիսին կլիներ վաղ կեղևը, եթե ներառենք մի ջերմային աղբյուր, որը հաճախ բաց է թողնվում՝ տիեզերական հարվածները։ Նվազող, ստոխաստիկ հարվածների հոսքի մոդելը միավորելով կեղևի և մանտիայի ջերմափոխադրման ստուգված միաչափ ու երկչափ սիմուլյացիաների հետ, որոնք ներառում են նաև բարձրացող հալոցքի ջերմափոխադրումը, հեղինակները գտնում են, որ Հադեյանի մեծ մասում ժամանակի ընթացքում կուտակված հարվածային ջերմությունը Երկրի ամբողջ ներքին ջերմությունը գերազանցել է առնվազն մեկ կարգով։ Արդյունքում կեղևը մնում է բարակ՝ մոտ 5 կմից պակաս, և մասամբ հալված արդեն մի քանի կիլոմետր խորության վրա։ Մոտ 5 կմ խորությունում հալոցքի բաժինը կարող է գերազանցել 30%-ը՝ չափազանց թույլ վիճակ ժամանակակից սալերի տեկտոնիկան պահպանելու համար։ Այսպիսի կեղևի մեծ մասը կվերամշակվեր դեպի մանտիա՝ բացատրելով, թե ինչու Հադեյանի նյութ

գրեթե չի պահպանվել։ Երբ հարվածները թուլանում են մոտ 4,0–3,9 Ga անցման շրջանում, կայուն մայրցամաքային կեղևի ձևավորումը դառնում է հնարավոր՝ մոտավորապես այն ժամանակ, երբ հայտնվում են ամենահին պահպանված ֆելզիկ ապարները։ Քանի որ հեղինակները միտումնավոր օգտագործել են պահպանողական՝ ստորին սահմանային տաքացում, որակական արդյունքը բավական կայուն է, թեև ճշգրիտ թվերը ոչ։ Սա վաղ Երկրի ուժեղ և հետևողական մոդել է, ոչ նրա ուղղակի դիտարկում։

Առանց չափազանցության

Ի՞նչ է ցույց տալիս աշխատանքը։ Ֆիզիկապես հիմնավորված սիմուլյացիաներում, որոնք ներառում են հարվածային տաքացումը և մագմատիկ ջերմափոխադրումը, Հադեյանի կեղևը ստացվում է բարակ և մի քանի կիլոմետր խորությունից մասամբ հալված, էներգետիկորեն գերիշխում է հարվածների ջերմությունը, կեղևի մեծ մասը վերամշակվում է դեպի մանտիա, և այս մոդելում սալերի տեկտոնիկայի կայուն գործարկումը քիչ հավանական է։

Ի՞նչն է հավանական, բայց ապացուցված չէ։ Որ հարվածների թուլացումն է պատճառը, որ մոտ 3,9 Ga սկսում են պահպանվել երկարատև մայրցամաքներ, որ Հադեյանը «կանգնած» կամ փափուկ կափարիչով աշխարհ էր, ոչ վաղ սալերի տեկտոնիկայով, և որ Հադեյանի ապարների գրեթե ամբողջ բացակայությունը հենց կիսահալված կեղևի վերամշակման հետևանքն է։

Ի՞նչ չի ցույց տալիս։ Հադեյանի կեղևի ուղղակի չափում, սալերի տեկտոնիկայի բանավեճի վերջնական լուծում, ռմբակոծման թուլացման և առաջին մայրցամաքների միջև ապացուցված պատճառական կապ, Jack Hills-ի ցիրկոնները որպես պահպանված մայրցամաքներ կամ վաղ մոլորակի ամբողջական մոդել։

Հիմնական սահմանափակումները։ Հադեյանի ապարային արխիվը գրեթե գոյություն չունի, ուստի արդյունքը հիմնվում է սակավ տվյալներով սահմանափակված մոդելների շղթայի վրա՝ հարվածների հոսք → գեոդինամիկա → փուլային հավասարակշռություն։ Հարվածների հոսքի ընտրությունն ինքնին անորոշ է, իսկ սիմուլյացիաները իդեալականացված են՝ միաչափ ու երկչափ կտրվածքներ և առանձին ժամանակային պատկերներ։ Պահպանողական ստորին սահմանային ենթադրությունները ուժեղացնում են որակական եզրակացությունը, բայց ճշգրիտ երկրաջերմային պրոֆիլները չեն դարձնում հաստատուն։

Որքա՞ն վստահություն պետք է ունենա ընդհանուր ընթերցողը։ Բարձր՝ որ հավանական ֆիզիկայի դեպքում ուժեղ ռմբակոծվող վաղ Երկիրը կունենար տաք, բարակ և մակերեսին մոտ մասամբ հալված կեղև։ Միջին՝ որ դա Հադեյանի սալերի տեկտոնիկան քիչ հավանական է դարձնում և օգնում է բացատրել կորած ապարային արխիվը։ Ցածր՝ այն պնդումների նկատմամբ, թե սա *ապացուցում է* մայրցամաքների ձևավորման կոնկրետ մեխանիզմը կամ ճշգրիտ ժամանակը։ Սա Հադեյանը վերաիմաստավորող ուժեղ, պահպանողական մոդել է, ոչ ուղիղ հայացք

անցյալին։

Աղբյուրներ

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