

Válasz Prof. Dr. Lóczy Dénes opponens bírálataira

Először is szeretném megköszönni Lóczy Dénes professzor konstruktív bírálatát. A felvetett kérdésekre az alábbi válaszokat adom (vastag dőlt betűvel kiemelve).

1. A disszertáció legáltalánosabb kérdésfelvetése az, hogy milyen szélsőséges állapotok jellemezték az északi félgömb éghajlatát a pleisztocén végén, elsősorban az utolsó glaciális maximum (LGM) idején. A szerző axiómaként fogadja el, hogy a légköri porszállítás nagy szerepet játszott azokban a hirtelen éghajlatingadozásokban, amelyeket Dansgaard-Oeschger (D-O) ciklusokként ismerünk. A disszertáció ugyan nem kifejezetten ezzel a problémával foglalkozik, de felmerül a kérdés: Mennyire megbízhatóan becsülhető meg a porkoncentráció változásának jelentősége az időjárás alakításában, ha hatása a ^{18}O izotóp görbéből kikövetkeztetett hőmérséklethez képest gyakran csak 8 év késéssel mutatkozik meg? A mérések egyáltalán megengedik-e a késleltetés időben ilyen pontos meghatározását?

Válasz: A kérdés második felére vonatkozóan Ruth et al. (2017), újabban pedig Erhardt et al. (2019) és Capron et al. (2021) vizsgálatai alapján kijelenthető, hogy a jég $\delta^{18}\text{O}$ értékei és a porkoncentráció gyakorlatilag egyidejűleg változtak a NorthGRIP és a NEEM jégfúrásokban. Mivel a jégmagok éves, sőt szezonális felbontást is megengednek, így a statisztikailag megállapított 1 ± 8 év késleltetés a porkoncentráció változásaiban az oxigénizotóp eltolódásokhoz képest teljesen korrekt és arra utal, hogy Grönland éghajlata gyakorlatilag szinkronban kellett megváltozzon a mindenkori jégmag aeroszolok forrásainak éghajlatával. Ami a kérdés első felét illeti, bár a légköri ásványi por direkt és indirekt módon is hatást gyakorol a globális éghajlatra különböző fizikai és biokémiai folyamatok révén, azonban fontos kiemelni, hogy nem ezek a folyamatok okozhatták a Dansgaard-Oeschger ciklusokat és ezt a rövid értekezésemben nem is állítottam. A főbb okokra nem szerettem volna kitérni, mert nem ez volt a munkám fókuszában, de azok között az AMOC változásai, a tengeri jég dinamikája és ehhez kapcsolódó légköri visszacsatolások, vagy éppen a Laurenciai jégtakaró magasságváltozásai a legvalószínűbbek (Li & Born, 2019; Landais et al., 2022).

2. A disszertáció alapját képező tanulmányok központi témája inkább a hirtelen klímaingadozásokat kiváltó porterhelés eredetének kutatása. Ezért a nemzetközi folyóiratokban megjelent tanulmányok részletesen vizsgálják a lösz és azon belül a kvarcásványok szemcseeloszlását, mint a forrásterület meghatározásában döntő fontosságú proxy adatot. Az idevonatkozó kérdés: Hogyan küzdött meg a jelölt azzal problémával, hogy a vizsgált jégmagok gyakran az elemzésekhez (a ritka elemek, mint pl. a hafnium izotóp arányainak meghatározása) szükségesnél kisebb porkoncentrációt tartalmaztak?

Válasz: A grönlandi NorthGRIP jégmagban mért porkoncentrációk jelentős ingadozásokat mutatnak a legmagasabb porkoncentrációval jellemezhető korai LGM periódustól (8,79 mg por/kg jég, 25,79 ezer év) a holocén elejére jellemző minimumokig (0,04-0,07 mg/kg jég). A hafnium izotóp elemzések esetében valóban kihívást jelentettek az alacsony porkoncentrációk, így elsősorban az LGM legporosabb eseményeire tudunk koncentrálni a méréseinkkel, míg pl. a holocénre ezt meg sem próbáltuk. A felsőkontinentális kéregre jellemző átlagos hafnium (Hf) koncentráció 5,3 ppm, tehát 6-8 mg/kg porkoncentráció esetén is csak 30-40 ng Hf áll rendelkezésre az izotópelemzésekhez. Az általam kidolgozott ammónium-bifluoridos oldási módszerrel és kapcsolódó oszlopkromatográfiai eljárással, valamint egy 10^{13} Ohm-os ellenállású erősítővel ellátott MC-ICP-MS-szel körülbelül 2 mg pormennyiség elegendő a kombinált Sr-Nd-Hf izotóp elemzésekhez. Ez természetesen behatárolja a módszer alkalmazhatóságát, de megjegyzem, hogy ilyen típusú kombinált

izotópelemzések (különösen Hf izotóp elemzések) valószínűleg éppen a fentiek miatt nem valósultak meg korábban az igen kis mennyiségben rendelkezésre álló jégmag aeroszol mintákon.

3. Az agyagásványok előfordulása is adatokat szolgáltat a por származási területére, de az ásványfajta (illit, klorit stb.) eloszlása számos potenciális forrásterületen közel azonos. Lehet-e jelentősége a szmektit arányában mutatkozó különbségeknek?

Válasz: Igen, lehet. A szmektit az egyik kulcsfontosságú agyagásvány csoport a lehordási terület meghatározása szempontjából, mert az utolsó glaciális maximum (LGM) jégmag mintái minden esetben szmektit szegénynek bizonyultak. Ez jó néhány szmektit gazdag forrás nagy biztonsággal történő kizárására ad lehetőséget és a jégmag pormintákban viszonylag kisebb, 20% körüli mennyiségben jelen lévő kaolinittel együtt arra utal, hogy a jégmag aeroszokok nem alacsony szélességeken elhelyezkedő forrásokból származnak. A legvalószínűbb porforrások a szintén szmektitben szegény összetételű mutató Takla-Makán és Tengger-sivatagok üledékei lehetnek, azonban ilyen alacsony szmektit tartalmú üledékek Észak-Afrikában is előfordulnak, sőt a Kárpát-medencében is. További bizonytalanság, hogy a szmektit preferenciális kiülepedését figyelték meg közel-keleti porviharos események során (Singer et al., 2004), ami nem zárja ki annak a lehetőségét, hogy a hosszabb távú légköri transzport során a szmektit mennyisége a szállított porban lecsökken a porforrások üledékeihez képest (Scheuven et al., 2013). Ennélfogva – véleményem szerint – olyan üledékek sem zárhatók ki a jégmag aeroszokok forrásaiként, amelyek esetén a szmektit csoport mennyisége az összes agyagásvány 20-30 %-át teszi ki, mint az pl. néhány közép-kelet európai potenciális forrás esetén jellemző. Világos, hogy olyan részletes agyagásványtani vizsgálatokra lenne szükség, amely a forrásüledékek és a kibocsátott por összetételének meghatározását is magában foglalja a légköri transzport távolság függvényében.

4. A jelölt az agyagásványok víztartalmának hidrogénizotóp-arányaiból küszöbértéket állapít meg a grönlandi magfúrásokban feltárt poranyag származási helyének földrajzi azonosítására. Ezzel kapcsolatos kérdés: Hogyan ítéli meg, mennyire pontosan határozható meg a por eredete a különböző agyagásványokban rejlő környezetindikátorok segítségével? Az agyagásványok hidrogénizotóp-arányai mennyire tekinthetők állandónak a porlerakódás után?

Válasz: A forrásazonosításban korábban csak az agyagásványos összetétel volt mód felhasználni, ami sok esetben viszonylag jó indikátora a lehordási területnek, de nem minden esetben. Az agyagásványok szerkezeti vízének hidrogénizotóp összetétele ($\delta^2\text{H}_{\text{aszv}}$) egy teljesen új indikátor a forrásazonosításban, bár megjegyzem, hogy ilyen méréseket már az 1970-es évek óta végeznek (Savin & Epstein, 1970). Az agyagásványok rétegek közötti terében vagy azok felületén lévő adszorbeált víz a légköri vízgőzzel néhány órán belül kicserélődik, így ennek izotópos összetétele nem tartalmaz információt az agyagásvány képződési környezetéről, tehát ezeket el kell távolítani a D/H izotóp mérések előtt (vákuumban, 3 órára 250 °C-ra hevítve a mintát). Az agyagásványok D/H izotópos összetétele a környezeti víz izotópos összetételétől, az ásványok kialakulásának idején uralkodó hőmérséklettől és a képződés hőmérsékletén (izotópos egyensúlyban) jellemző ásványspecifikus izotópfractionációs tényezőtől függ, valamint attól is, hogy az ásvány megtartotta-e az eredeti izotópos összetételét (Savin & Hsieh, 1998). A felszínen képződött agyagásványok esetében a környezeti víz a csapadékvíz vagy a talajvíz, a képződési hőmérséklet pedig megközelíti a földfelszíni hőmérsékletet és a szakirodalomban található korábbi vizsgálatok arra utalnak, hogy míg a gyengén kötött rétegek közötti víz esetén könnyen végbemegy az izotópcseré, addig az erősen kötött szerkezeti víz esetén földfelszíni körülmények között ez nem meghatározó (Bauer & Vennemann, 2014). Az általunk vizsgált porminták feltehetően

elsősorban detritális agyagásványokból állnak, amelyek egy adott helyen kémiai mállás révén keletkeztek, és amelyek keletkezési kora és eredete különböző lehet. Ezen különböző D/H izotópösszetételű agyagásványok összessége határozza meg az egyes potenciális lehordási területekre jellemző δ^2H_{aszv} értékeket. A munkánk során azt találtuk, hogy az egyes forrásterületek δ^2H_{aszv} -értékei kellően jól meghatározottak ahhoz, hogy forrásdiagnosztikusak lehessenek, hasonlóan a normál agyagásvány összetételhez. Véleményem szerint míg a gyengén kötött rétegekben vízben végbemehetett egy izotópcsera a légköri transzport során, vagy a grönlandi jégtakarón történt kiülepedést követően, addig a szerkezeti víz esetén ezt nem tartom valószínűnek, tehát annak D/H izotóp összetétele nagy valószínűséggel a porforrások üledékeinek összetételét tükrözi. Erre vonatkozó méréseim vagy bizonyítékaim azonban nincsenek.

5. A számos tanulmány ellenére a közép-európai és a grönlandi porfelhalmozódás párhuzamosítása messze nincs még véglegesen tisztázva. Az erre vonatkozó tanulmányok a jelenleg elérhető adatok alapján tételeznek fel ok-okozati kapcsolatokat a két helyszínen megfigyelhető folyamatok között, de újabb minták feldolgozása, ill. a koradatok pontosabb kalibrálása, a bizonytalanságok csökkentése ezeket az összefüggéseket módosíthatja. Ez a szárazföldi csigafaunán alapuló kalibrációra is vonatkozik. Hogyan látja a jelölt ennek lehetőségét?

Válasz: A grönlandi és a közép-európai porfelhalmozódási ráták vonatkozásában szembetűnő, hogy a porkoncentráció csúcsa a NorthGRIP jégmag esetén 25800 év körülre esik (Rasmussen et al., 2014), hasonlóképpen a dunaszekcsői löszrétegsorból rekonstruált akkumulációs ráták maximumaival. Ezzel ellentétben az mára világossá vált, hogy a Kínai Löszplatóról származó adatok szerint az ottani porfelhalmozódási maximum jóval későbbre esik (23-19 ezer évek között; Cheng et al., 2021). Ez persze nem feltétlenül jelent kauzális kapcsolatot a grönlandi és közép-európai porfelhalmozódás között, de lehet egy érv amellet, ugyanis a jégmagokban megfigyelt $\delta^{18}O$ és Ca^{2+} ion koncentrációk közötti nagyfokú szinkronitás arra utal, hogy a grönlandi glaciális jégmag aeroszolk forrásainak éghajlata és Grönland éghajlata erősen összekapcsolt lehetett. Természetesen további vizsgálatok szükségesek európai löszrétegsorokból ennek a kapcsolatnak a megerősítésére, amihez nagyfelbontású (5-10 cm/minta) radiokarbon kronológiák kellenek. Jelenleg azonban az adatok nagy része lumineszcens kormeghatározásból származik és az a kevés rétegsor, ahonnan ^{14}C adatok állnak rendelkezésre sajnos kis felbontással korolt. Az általam követett, kis héjú molluszkákra vagy éppen a giliszta kalcitra alapuló ^{14}C kormeghatározás jó lehetőséget biztosít további nagy felbontású löszkronológiák kidolgozásához, hogy jobban megérthessük a két régió között feltételezett porszállításra vonatkozó kapcsolatokat.

Sopron, 2023. június 16.



Újvári Gábor PhD
tudományos főmunkatárs
CSFK Földtani és Geokémiai Intézet

Irodalom

- Bauer, K. & Vennemann, T. W. (2014). Analytical methods for the measurement of hydrogen isotope composition and water content in clay minerals by TC/EA. *Chemical Geology* 363, 229–240.
- Capron, E. et al. (2021). The anatomy of past abrupt warmings recorded in Greenland ice. *Nature Communications* 12(1), 2106.
- Cheng, L. Q. et al. (2021). Drivers for asynchronous patterns of dust accumulation in central and eastern Asia and in Greenland during the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters* 48(5), e2020GL091194.
- Erhardt, T. et al. (2019). Decadal-scale progression of the onset of Dansgaard–Oeschger warming events. *Climate of the Past* 15(2), 811–825.
- Landais, A. et al. (2022). Abrupt climatic variability: Dansgaard–Oeschger events. in: Palacios, D., Hughes, P. D., García-Ruiz, J. M., Andrés, N. (Eds.), *European Glacial Landscapes*, Elsevier, Chapter 24, 175–180.
- Li, C., Born, A. (2019). Coupled atmosphere-ice-ocean dynamics in Dansgaard-Oeschger events. *Quaternary Science Reviews* 203, 1–20.
- Rasmussen, S. O. et al. (2014). A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the last glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: Refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews* 106, 14–28.
- Ruth, U. et al. (2007). Ice core evidence for a very tight link between North Atlantic and east Asian glacial climate. *Geophysical Research Letters* 34(3), L03706.
- Savin, S. M. & Epstein, S. (1970) The oxygen and hydrogen isotope geochemistry of clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 34(1), 25–42.
- Savin, S. M. & Hsieh, J. C. C. (1998) The hydrogen and oxygen isotope geochemistry of pedogenic clay minerals: Principles and theoretical background. *Geoderma* 82(1–3), 227–253.
- Scheuven, D. et al. (2013). Bulk composition of northern African dust and its source sediments — A compilation. *Earth-Science Reviews* 116, 170–194.
- Singer, A. et al. (2004). Properties of the non-soluble fractions of suspended dust over the Dead Sea. *Atmospheric Environment* 38, 1745–1753.