

Válasz Prof. Dr. Pósfai Mihály opponens bírálatára

Szeretném megköszönni Pósfai Mihály professzor konstruktív, de a rövid értekezés eredményeivel kapcsolatos bizonytalanságokra is rámutató bírálatát. Az általa felvetett kérdésekre és megjegyzésekre az alábbi válaszokat adom (vastagon szedett dőlt betűvel kiemelve).

1. A grönlandi por forrásterületeinek azonosítására a Szerző változatos stabilizotópos módszereket használt (Sr-Nd-Hf, H), és agyagásvány-összetételek elemzését vetette be. Ez a megközelítés feltételezi, hogy adott forrásterületnek létezik egy izotópos és/vagy agyagásványtani „ujjlenyomata”. A légköri aeroszollal kapcsolatos saját tapasztalataim alapján is a témával foglalkozó légkörkémikusok és modellezők szerint létezik “arizonai por” vagy “csádi por”, holott mindegyikben általában ugyanazok a közetalkotó szilikátok vannak, legfeljebb más arányokban. Különösen furcsának tűnik a “szaharai” vagy “észak-afrikai” por emlegetése egy kontinensnyi méretű, geológiailag változatos sivatag esetén. A dolgozatban közzétett eredmények sem arra utalnak, hogy egyértelműen azonosítható lenne egy-egy porkibocsátó terület, hiszen:

- a) a 2. ábrán látható, agyagásványokra vonatkozó $\delta^2\text{H}$ értékek szerintem nem mutatnak általános összefüggést a földrajzi szélességgel (csak annyit, hogy a szélső értékek a legészakibb és legdélibb területre vonatkoznak, ahogy ezt a 4. tézispont kifejti);
- b) a 3. ábrán látható Sr és Nd izotópos adatok szerint a különböző forrásterületekre vonatkozó értékek átfednek, az egyes területekre vonatkozó domének határvonalai meglehetősen tetszőlegesen meghúzótnak tűnnek;
- c) a 4. ábrán a Nd és Hf izotópos értékek is részben átfednek a különböző forrásterületek között;
- d) a kíméletlen mintaelőkészítés, a karbonátok savazása különböző ásványi összetételű porkeverékek esetén szelektív oldással, ezáltal az eredeti izotópos arányok megváltozásával járhat; a sok preparatív munka miatt feltételezem, a méréseket erősen befolyásolja, melyik laboratóriumban készültek;
- e) végül: feltételezem, hogy bármilyen porhoz hasonló izotóp- és agyagásvány-összetételek előállíthatók az egyes források megfelelő arányú keverésével.

Válasz: A forrásterületek lehatárolásában valóban vannak bizonytalanságok. Ha a kelet-ázsiai forrásokról beszélünk, akkor itt általában egy-egy jól lehatárolt arid/szemi-arid sivatagi területet értelmezünk forrásként függetlenül attól, hogy milyen változatos a terület geológiája. Az afrikai források esetén az általunk követett forrásfelosztás részben korábbi munkák izotópos eredményeire épül (pl. Zhao et al., 2018), de természetesen tükröz egy generalizálási szándékot is, amit az áttekinthetőségre való törekvés igénye hajtott egy olyan munkában, ahol a grönlandi jégmag aeroszollok potenciális forrásai Észak-Amerikától Kelet-Ázsiáig nyúlnak. Való igaz, hogy egy ekkora sivatag esetén, mint a Szahara a geológia elég változatos a nyugat-afrikai kratontól az egyiptomi fiatal vulkanitokig és ez tükröződik a Sr-Nd-Hf izotóp összetételben is. Ahol ezeket a különbségeket láttuk ott próbáltunk a publikációkban utalni arra, hogy a generalizáltan észak-afrikai lehordási területként megjelölt források esetén pontosan mire gondolunk (pl. Marokkó, Atlasz, stb). Úgy találtam egyébként, hogy Sr-Nd-Hf izotóp összetételük alapján viszonylag jól lehatárolhatók pl. a nyugat-afrikai források és elkülöníthetőek a kelet vagy nyugat észak-afrikai források anyagától.

Az egyes rész kérdésekre térve:

a) a hidrogénizotóp adatokban látszik egyfajta szélességfüggés (2. ábra), de természetesen sokkal több adatra lenne szükség ahhoz, hogy ezt világosan bizonyítani vagy cáfolni

lehesen. Ezeknél a fiatal üledékeknél, amelyekben mind a detritális, mind pedig az autigén agyagásvány komponensek jelen lehetnek nem feltétlenül fog minden üledék szélességfüggést mutatni. De számunkra, miután nem paleoklimát szeretnénk rekonstruálni ez kevésbé fontos. Ami döntő, hogy az egyes források egymástól reprodukálhatóan elkülönülő hidrogénizotóp összetétellel bírjanak, legyen ennek bármilyen oka is, ezáltal pedig a δ^2H_{asv} forrási diagnosztikus legyen. A lehordási terület elemzésben tudomásom szerint ez volt az első próbálkozás a szerkezeti víz D/H izotóp összetételének felhasználására és egyértelmű, hogy mélyrehatóbb elemzések szükségesek a módszer használhatóságának további igazolására.

b) Az egyes források néhány esetben jól elkülönülnek a Sr-Nd izotóp adatokban, sok esetben azonban azok valóban átfednek egymással (3. ábra). Ezért is volt szükség újabb forrásindikátorokat keresni, mert a grönlandi por forrásai nem voltak megállapíthatók a Sr-Nd izotóp adatok alapján, ahogy arra már egy 2015-ös munkánkban utaltunk (Újvári et al., 2015). Szeretném kiemelni azonban, hogy a forrásterületeket jelölő domének határvonalai nem véletlenszerűek, a domének minden esetben azt a variabilitást tükrözik, amiket az adott források mintáiból származó mérési adatok reprezentálnak. Itt pusztán egy vizualizációs problémát oldottunk meg, ahol az ábra átláthatósága érdekében nem tudtuk az egyes mérési pontokat megjeleníteni azok nagy száma miatt, hanem ehelyett doménekkal reprezentáltuk az egyes forrásterületek jellemző változékonyságát a Sr-Nd izotópos térben.

c) Valóban, a Nd-Hf izotópos térben is ugyanez a helyzet, a domének átfednek, de ugyanúgy a források változékonyságát reprezentálják. Ezek az ábrák jól rámutatnak arra, hogy miért is volt szükség több forrásindikátorra: a források átfedése miatt. Több indikátor alapján tudtuk csak kizárni a legvalószínűtlenebb közvetlen forrásokat és rámutatni a legvalószínűbbekre.

d) A mintaelőkészítések során az egyetlen savazási lépés a gyenge ecetsavas kezelés volt, amellyel a tengeri sókat, illetve a jól oldható karbonátokat kellett eltávolítsuk, amelyek egyébként elfednék, illetve torzítanák a szilikátok Sr izotóp összetételét. Nem valószínű, hogy ez a lépés frakcionálná a szilikátok Sr izotóp összetételét, mert ezek feltárására eleve csak később került sor, de egyébként az ecetsavas kezeléssel kapott oldatok izotóppszétételét is megmértük. Az oszlopkromatográfia során erősebb savakkal is dolgoztunk, hogy kellő tisztaságú elem szeparátumokat kaphassunk, ami az izotópelemzések előfeltétele. Ezt minden laborban így végzik és az izotópelemzések eredményeinek pontosságát és az egyes laborok eredményeinek összehasonlíthatóságát referencia minták mérésével biztosítják. Ezt követve a módszerünket mi is jól meghatározott Sr-Nd-Hf izotóppszételű USGS referencia mintákkal teszteltük, amelyek bázikustól a felzikus kőzetmintákig tartalmaztak referenciamintákat (lásd Újvári et al., 2021b). Ennélfogva úgy vélem, hogy az eredményeink nem laborfüggők, azok összehasonlíthatók az irodalmi adatokkal, ha ugyanazokat a méretfrakciókat vetjük össze hasonló előkezelés után. Erre a legkevésbé érzékeny a Nd izotóp összetétel, leginkább a Sr izotóp összetétel esetén van szükség elővigyázatosságra.

e) Valóban, az egyes források keverésével szinte bármilyen összetételű por előállítható, különösen, ha a vulkanikus forrásokból történő hozzákeveredést sem zárjuk ki. Ugyanakkor véleményem szerint, bár elméletileg lehetséges, a valóságban leginkább akkor számolhatunk a különböző forrásokból kibocsátott aeroszolok keveredésével, ha az egyes források azonos légköri szállítási útvonalak, trajektóriák mentén helyezkednek el. Ilyen például bizonyos észak afrikai és európai források keveredésének a lehetősége, amelyet a munkámban fel is vettem és amit a transzport modellezések sem zárnak ki. Ugyanakkor vannak olyan szituációk, amik elképzelhetők, mint például a cirkum-Pacifikus vulkáni források és a kelet-ázsiai por keveredése, viszont a Hf izotóp elemzések eredményei alapján valószínűtlenek. Az Újvári et al. (2022) munkában Monte Carlo szimulációkat is végeztem

két vagy három forrásból származó porok elvi keveredéséből származó aeroszolok elméleti izotópösszetételére, azonban fontos kiemelni, hogy a Monte Carlo szimulációk végeredménye erősen függ azoktól a forrásterületek izotópösszetételi változékonyságát reprezentáló statisztikai eloszlásoktól, amelyekből a szimuláció során véletlen számokat generálunk. A kérdés itt az, hogy ismerjük-e megfelelően egy adott forrásterület Sr-Nd-Hf izotópösszetételi változékonyságát és azt milyen statisztikai eloszlás írja le legmegbízhatóbban.

2. Mindezzel együtt kérem, hogy

- a fenti a)-e) állításaimat cáfolja vagy árnyalja, ha nem ért velük egyet, és - érdekelne a véleménye – így utólag – hogy érdemes-e ekkora kutatási arzenált, munkai igényes és drága módszereket bevetni a kibocsátási területek izotópos és ásványtani módszerekkel történő azonosítására, ha előre láthatóan kétséges lesz az eredmény?

Válasz: A fent leírtakkal remélem sikerült árnyalnom a képet és rámutatnom, hogy egy rendkívül komplex problémának a megoldásában szerettünk volna előre lépni. Korábban széles körben úgy vélték, hogy egyértelműen kijelölhető a grönlandi jégmagokban lévő glaciális por közvetlen forrása, ami egyetlen lehordási terület. Rámutattunk azonban, hogy tudományos értelemben a forrásazonosításnak bizonytalanságai vannak és arra is, hogy bár költség- és laborigényes, de több indikátor felhasználásával a források és a lehetséges keveredési forgatókönyvek száma csökkenthető. Így például kizártuk a korábban széles körben elfogadott keveredési modellt a keleti-ázsiai és a cirkum-Pacifikus vulkáni por között és rámutattunk, hogy alapvetően két közvetlen forrása lehetett a grönlandi jégmag aeroszoloknak: a legvalószínűbb, hogy a Takla-Makán és/vagy Tengger-sivatagokból származnak, viszont a kelet-közép-európai eredet is lehetséges (Újvári et al., 2022).

3. A dunaszekcsői lösz csigáinak izotópos vizsgálatából kapott évszakos hőmérsékletváltozások, és a porfelhalmozódás mértékének megállapítása révén a Szerző kísérletet tesz a nagyléptékű légköri folyamatok, ezzel az éghajlatváltozás kiváltó okainak értelmezésére is. Elsősorban a poláris futóáramlás pozíciójának megváltozásával magyarázza a hőmérséklet kilengéseit. Ezzel kapcsolatban azonban hiányérzetem maradt, továbbra sem világos számomra, hogy ezek a pozícióváltások miért következtek be. Ezért az alábbi, meglehetősen általános kérdéseim vannak, és nem kizárólag a jelen kutatás eredményeire vonatkoznak, hanem a szakmai konszenzusra, ha egyáltalán létezik ilyen:

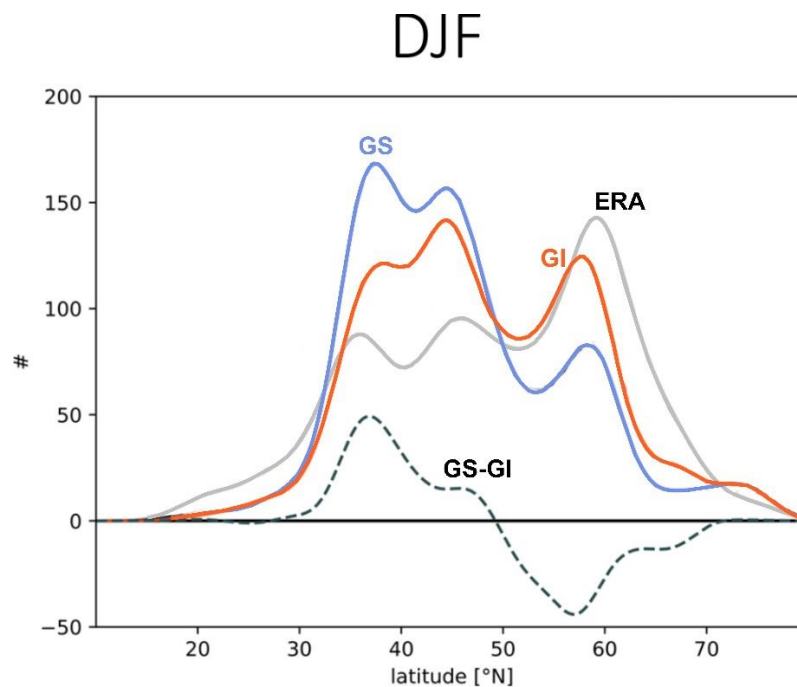
- Miért voltak ennyire rövid időtartamú, mai szemmel nézve hatalmas hőmérsékleti kilengések a glaciálisokban, és milyen tényezők fordították vissza a melegedést egy-egy ciklusban?

- Miért stabilizálódott az éghajlat kb. 12 ezer éve, mi az oka, hogy a holocénben nem tapasztaltunk akkora hőmérsékletváltozásokat, mint korábban?

Válasz: Az utolsó eljegesedés generálisan hideg ághajlatát számos – összesen 25 – Dansgaard-Oeschger (D-O) felmelegedés (interstadiális) szakította meg az Észak-Atlantikumban 115 ezer és 11,6 ezer évek között (Dansgaard et al., 1993; Landais et al., 2022), aminek hátterében az AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) erősödése, a pólusok irányába megnövekedett hőtranszport állhattak (Menviel et al., 2020). Több hipotézis is létezik az AMOC változások (erősödés/gyengülés vagy épp teljes leállás) és az általuk okozott stadiális lehűlések és interstadiális felmelegedések magyarázatára, így például hirtelen olvadékvíz beáramlások az Atlanti-óceán északnyugati régiójába (Clark et al., 2002; Rahmstorf, 2002) vagy éppen a Laurenciai jégtakaró fokozatos magasságváltozásai (Zhang et al., 2014a) illetve a légköri CO₂ koncentráció kismértékű, fokozatos változásai (Zhang et al., 2017; Vettoretti et al., 2022), valamint inszolációs kényszerek (Zhang et al., 2021). Fontos kiemelni, hogy a D-O variabilitás a 3-as tengeri

oxigénizotóp stádium (MIS 3, 57-29 ezer évek között) – egy köztes glaciális klímaállapot – során volt a legkifejezettebb (Zhang et al., 2014b), az intenzívebb glaciális fázisokban és az interglaciális klímaállapotok alatt nem jelenik meg. Ez arra utal, hogy az AMOC stabilitása a köztes glaciális klímaállapotok során kisebb és nagyban függ az adott klímaállapotra jellemző peremfeltételektől, úgymint a CO₂ koncentrációtól, az inszolációtól, az északi félteke kontinentális jégtakaróinak méretétől és a kapcsolódó tengerszinttől (Menviel et al., 2020). Ez segít választ adni arra a bírálói kérdésre, hogy miért nem jellemző a D-O variabilitás a holocénre: a peremfeltételek nem voltak kedvezőek egy instabil, oszcilláló AMOC kialakulásához.

Bár a D-O variabilitás teljes megértése még várat magára, mára kialakult egy konszenzus a legvalószínűbb mögöttes mechanizmusok tekintetében. A D-O variabilitás egy önmagát fenntartó oszcillációs, összekapcsolt éghajlat-jégtakaró keretrendszerben értelmezhető, amelyet az AMOC viszonylag alacsony stabilitása jellemez egy köztes glaciális klímaállapot körülményei között. Kis perturbációk (például az észak-atlanti óceán édesvízháztartásának százéves időléptékű változásai, CO₂ koncentráció változások vagy sztochasztikus légköri kényszerek; Drijfhout et al., 2013; Kleppin et al., 2015) az AMOC gyengüléséhez vezetnek és ezzel együtt a tengeri jég kiterjedésének gyors ütemű előrenyomulásához (Li & Born, 2019), és egy stadiális lehüléshez. Az AMOC gyengülése és a tengeri jég előretörése azonban idővel felszín alatti felmelegedéshez vezet az Atlanti-óceán északi részén a felszíni tengervíz csökkent sótartalmának köszönhetően kialakuló erős északi-tengeri haloklin okozta redukált légkör irányú hőtranszfer miatt (Dokken et al., 2013), valamint az ITCZ déli irányba történő elmozdulása révén, amely megnöveli a felszíni tengervíz sótartalmát az Észak-Atlanti-óceán trópusi régiójában (Krebs & Timmermann, 2007) és a sótranszportot az Észak-Atlantikum irányába. Több évszázados időskálán ezek az éghajlati változások negatív visszacsatolásként hatnak az AMOC-ra és a tengeri jégre, ami az AMOC helyreállításához és a tengeri jég visszahúzóódásához vezetnek egy interstadiális felmelegedésben kulminálva.



1. ábra: Modellezett, téli negyedévre (DJF) vonatkozó észak-atlanti poláris jet pozíciók a GI-10 interstadiálisra és a GS-9 (Heinrich-4) stadiálisra. Összehasonlításképpen az ERA-Interim reanalízis adatok alapján az 1979-2019 közötti preiódusra számolt jet pozíciók is feltüntetésre kerültek. Bővebb információ a szövegben.

A rövid értekezésem tárgyát tekintve a D-O típusú klímaváltozások fent tárgyalt okainál fontosabb kérdés azonban, hogy azok milyen módon voltak képesek befolyásolni Európa és Kelet-Közép-Európa (vagy épp Ázsia) éghajlatát. Véleményem szerint ebben nagy szerepe kellett legyen bizonyos légköri átviteli mechanizmusoknak, így a poláris futóáramlás pozíciójában bekövetkezett változásoknak (Újvári et al., 2017, 2021a), amint azt a 9. tézisemben meg is fogalmaztam. A glaciális időszak alatt az északi félteke kontinentális jégtakaróinak kiterjedése jelentősen megnövekedett, ami eleve délibb poláris jet pozíciókhoz vezetett (Pausata et al., 2011; Merz et al., 2015), ami viszont a ciklonos Rossby hullámtöréseknek kedvez az anticiklonosakkal szemben, szintén elősegítve egy, az egyenlítőhöz közelebbi jet pozíció fenntartását (Riviére et al., 2010; Löffverström et al., 2016). Mint fentebb említésre került a D-O események során jelentős változások álltak be a tengerfelszín vízhőmérsékletében, a tengeri jég kiterjedésében és az óceán-légkör közötti hőtranszferben, ami légnyomás anomáliákon keresztül befolyásolhatta a poláris jet pozíciókat (Madonna et al., 2017). A feltételezést, miszerint a poláris futóáramlás pozíciója a stadiális fázisokban délebbi, az interstadiálisokban északabbi lehetett német kollégák segítségével az idei év tavaszán teszteltük a Max Planck Intézet Föld-rendszer modelljével végzett nagyléptékű futtatások leskálázásának eredményei segítségével. A két, úgynevezett „timeslice” vagy időablak kísérlet a 41 ezer évvel ezelőtti GI-10 interstadiálisra és az ezt követő, 40 ezer év körüli GS-9 stadiálisra fókuszált, ami egyben a H4 Heinrich eseményt magában foglaló, különösen hideg stadiális volt. Az eredmények szerint -amelyek egyelőre még publikálatlanok – a grönlandi stadiálisok (GS) során a délebbi (40° északi szélesség körüli) jet pozíciók statisztikusan sokkal gyakoribbak, mint a grönlandi interstadiálisok során (GI), melyeknél az északabbi jet pozíciók a jellemzőbbek (1. ábra), hasonlóan az 1979-2019 közötti időszakot reprezentáló ERA-Interim reanalízis jet pozícióihoz. Feltételezésem szerint egy a D-O stadiálisok és interstadiálisok során hidegebb, illetve melegebb Észak-Atlantikum elsősorban a változó poláris jet pozíciókon keresztül befolyásolhatta közvetlenül és viszonylag kis időbeli késlettel Kelet-Közép-Európa éghajlatát és végső soron a szezonális hőmérséklet és csapadékeloszláson, valamint a vegetációs- és szélviszonyokon keresztül a porfelhalmozódás ütemét.

4. A fenti, a dolgozat tartalmát érintő megjegyzéseken túl néhány kisebb jelentőségű formai-nyelvi kritikám van:

- Bevezetés és Összefoglalás: valószínűleg a terjedelmi korlátok miatt kissé túl tömör és tagolatlan mindkét rész, vannak egyeztetési és vesszőhibák, és helyenként túl hosszú, bonyolult mondatok (főleg az összefoglalásban). **Ezt sok esetben nem tudtam elkerülni, valóban a terjedelmi korlátok miatt.**
- 7. oldal: “A szemcseméret és az ásványtan izotópos összetételre gyakorolt hatásának..” – az ásványtan egy tudomány, annak nincs hatása az izotópos összetételre. **Jogos kritika, ez egy elírás volt.**
- Következtesen alumínium-szilikátként említ minden szilikátot (azt hiszem, ez az amerikai légkörös szakirodalom hatása) – pl. kvarc és más Al-mentes szilikát is előfordulhat a vizsgált anyagban, ezért elegendő lenne a “szilikát”. **Ezzel egyetértetek, az „aluminoszilikát” kifejezést a nemzetközi irodalomból vettem át és valóban hibás szóhasználat.**
- “kondritikus” – szerintem inkább “kondritos” magyarul. **Egyetértetek, hogy a „kondritos” kifejezés megfelelőbb.**
- 11. oldal, (3) egyenlet: nem hiányzik egy-egy zárójel a számlálóból és a nevezőből is? **Valóban, itt a mélység-és karkülönbségek hányadosáról van szó, így a zárójelek szükségesek.**

- 12. oldal: a kvarcra miért használ 0,1 abszorpciós indexet, nem átlátszó? **Igen, a kvarc valóban transzparens. A lézerdiffrakciós mérések során azonban az abszorpciós index még az átlátszó ásványok esetén is 0,01-0,1 értékű, elsősorban a nem szabályos gömb alak és a felületi egyenetlenségek miatt. A Malvern kézikönyve**

(<https://www.malvernpanalytical.com/en/learn/knowledge-center/technical-notes/tn101104selectingparticleabsorbtiolaserdiffraction>) egy átlátszó CaCO_3 ásvány szemcsékből álló minta esetére mutatja be a megfelelő abszorpciós index kiválasztását és megállapítja, hogy a legjobb választás a 0,1-es érték, de a 0,01 is megfelelő. Az abszorpciós index megválasztásának egyébként a kvarc méreteloszlásokra minimális hatása van, mert csak a legfinomabb agyag és nagyon finom szilt frakciók (<4-5 μm) esetén van jelentősége és ezek a frakciók összesen 1-5%-os gyakorisággal voltak jelen a kvarc szemcseméret eloszlásokban. Ezen felül egy ilyen szisztematikus hiba, ha ezt hibának nevezhetjük, a teljes adatsort egy adott irányba mozdítja, így az eloszlások egymással összehasonlíthatók egy adott rétegsorban.

- 15. oldal tetején: “a magasabb hőmérséklet és $\delta^{18}\text{O}_{\text{test}}$ értékek felé mutató tendenciák..” ezt a mondatot nem értem. **Itt az Újvári et al. (2021a) cikk S5b szupplementum ábrájára utaltam, ahol a $\delta^{18}\text{O}_{\text{test}}$ értékeket a rekonstruált csigahéj D_{47} hőmérsékletek függvényében ábrázoltam a vizsgált stadiálisokra és interstadiálisokra, és ez utóbbiak esetén pozitívabb $\delta^{18}\text{O}_{\text{test}}$ és D_{47} hőmérséklet értékek voltak megfigyelhetők. Sajnos nem voltam teljesen világos, mert nem utaltam erre az ábrára közvetlenül a rövid értekezés szövegében.**

- Az 1. ábra vízszintes tengelyén balról jobbra haladtunk előre az időben, a 6. és a további hasonló ábrákon jobbról balra - van ennek valami jelentősége? Engem megzavart. **Elnézést kérek ezért! Nem voltam konzekvens ilyen tekintetben. Az 1. és a 6-7. ábrákat különböző időpontokban készítettem és nem figyeltem arra, hogy az idő tengely ugyanabba az irányba mutasson.**

- A 8. ábra felső paneljén mi az oka a függőleges tengely fordított tájolásának (lefelé növekvő inszoláció)? **Ennek pusztán technikai/vizualizációs jelentősége van. Szerettem volna, ha az inszolációs görbék a porfluxus görbékkel futnak és így jobban látható lenne a porfelhalmozódás felfutásának, illetve csúcsának az inszoláció csökkenésével és minimumával való egybeesése.**

- 9. ábra aláírásában: “Csigaházak... hőmérséklete” – helyesen a csigaházak környezetének hőmérséklete. **Igen, ezzel is tökéletesen egyetértek. Helyesebb lett volna a „csigaházak környezetének hőmérséklete” használata.**

Sopron, 2023. június 21.

Újvári Gábor PhD
tudományos főmunkatárs
CSFK Földtani és Geokémiai Intézet

Irodalom

- Clark, P. U., Pisias, N. G., Stocker, T. F. & Weaver, A. J. (2002). The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature* 415, 863–869.
- Dansgaard, W., Johnsen, S., Clausen, H., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Hammer, C., et al. (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218–220.
- Dokken, T., Nisancioglu, K., Li, C., Battisti, D., Kissel, C. (2013). Dansgaard-Oeschger cycles: Interactions between ocean and sea ice intrinsic to the Nordic seas. *Paleoceanography* 28, 491–502.
- Drijfhout, S., Gleeson, E., Dijkstra, H. A., Livina, V. (2013). Spontaneous abrupt climate change due to an atmospheric blocking-sea ice-ocean feedback in an unforced climate model simulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110, 19713–19718.
- Kleppin, H., Jochum, M., Otto-Bliesner, B., Shields, C. A., Yeager, S. (2015). Stochastic atmospheric forcing as a cause of Greenland climate transitions. *Journal of Climate* 28, 7741–7763.
- Krebs, U., Timmermann, A. (2007). Tropical air–sea interactions accelerate the recovery of the Atlantic meridional overturning circulation after a major shutdown. *Journal of Climate* 20, 4940–4956.
- 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.
- Löfverström, M., Caballero, R., Nilsson, J., Messori, G. (2016). Stationary wave reflection as a mechanism for zonalising Atlantic winter jet at the LGM. *Journal of the Atmospheric Sciences* 73(8), 3329–3342.
- Madonna, E., Li, C., Grams, C.M., Woollings, T., 2017. The link between eddy-driven jet variability and weather regimes in the North Atlantic-European sector. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 143, 2960–2972.
- Menviel, L. C., Skinner, L. C., Tarasov, L., Tzedakis, P. C. (2020). An ice–climate oscillatory framework for Dansgaard–Oeschger cycles. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 677–693.
- Merz, N., Raible, C. C., Woollings, T. (2015). North Atlantic eddy-driven jet in interglacial and glacial winter climates. *Journal of Climate* 28, 3977–3997.
- Pausata, F. S. R., Li, C., Wettstein, J. J., Kageyama, M., Nisancioglu, K. H. (2011). The key role of topography in altering North Atlantic atmospheric circulation during the last glacial period. *Climate of the Past* 7, 1089–1101.
- Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 207–214.
- Rivière, G., Lainé, A., Lapeyre, G., Salas-Méla, D., Kageyama, M. (2010). Links between Rossby wave breaking and the North Atlantic Oscillation–Arctic Oscillation in present-day and Last Glacial Maximum climate simulations. *Journal of Climate* 23, 2987–3008.
- Újvári, G., Stevens, T., Svensson, A., Klötzli, U.S., Manning, C., Németh, T., Kovács, J., Sweeney, M.R., Gocke, M., Wiesenberg, G.L.B., Markovic, S.B., Zech, M. (2015). Two possible source regions for central Greenland last glacial dust. *Geophysical Research Letters* 42, 10399–10408.
- Újvári, G., Stevens, T., Molnár, M., Demény, A., Lambert, F., Varga, Gy., Jull, A. J. T., Páll-Gergely, B., Buylaert, J.-P., Kovács, J. (2017). Coupled European and Greenland last

- glacial dust activity driven by North Atlantic climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114, 10622–10631.
- Újvári, G., Bernasconi, S. M., Stevens, T., Kele, S., Páll-Gergely, B., Surányi, G., Demény, A. (2021a). Stadial-interstadial temperature and aridity variations in East Central Europe preceding the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 36, Paper: e2020PA004170.
- Újvári, G., Klötzli, U., Horschinegg, M., Wegner, W., Hippler, D., Kiss, G. I., Palcsu, L. (2021b). Rapid decomposition of geological samples by ammonium bifluoride (NH₄HF₂) for combined Hf-Nd-Sr isotope analyses. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 35, Paper: e9081.
- Újvári, G., Klötzli, U., Stevens, T., Ludwig, P., Vennemann, T., Gier, S., Horschinegg, M., Palcsu, L., Hippler, D., Kovács, J., Di Biagio, C., Formenti, P. (2022). Greenland ice core record of last glacial dust sources and atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127, e2022JD036597.
- Vettoretti, G., Ditlevsen, P., Jochum, M. et al. (2022). Atmospheric CO₂ control of spontaneous millennial-scale ice age climate oscillations. *Nature Geoscience* 15, 300–306.
- Zhang, X., Lohmann, G., Knorr, G., Purcell, C. (2014a). Abrupt glacial climate shifts controlled by ice sheet changes. *Nature* 512, 290–294.
- Zhang, X., Prange, M., Merkel, U. & Schulz, M. (2014b). Instability of the Atlantic overturning circulation during Marine Isotope Stage 3. *Geophysical Research Letters* 41, 4285–4293.
- Zhang, X., Knorr, G., Lohmann, G., Barker, S. (2017). Abrupt North Atlantic circulation changes in response to gradual CO₂ forcing in a glacial climate state. *Nature Geoscience* 10, 518–523.
- Zhang, X., Barker, S., Knorr, G. et al. (2021). Direct astronomical influence on abrupt climate variability. *Nature Geoscience* 14, 819–826.
- Zhao, W., Balsam, W., Williams, E., Long, X., & Ji, J. (2018). Sr–Nd–Hf isotopic fingerprinting of transatlantic dust derived from North Africa. *Earth and Planetary Science Letters* 486, 23–31.