

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Stroncium és ólom izotóparányok alkalmazása
élelmiszeripari termékek és régészeti leletek azonosításában**

Horváth Anikó

Témavezető: Dr. Palcsu László



DEBRECENI EGYETEM

Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2024

Készült

a Debreceni Egyetem Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács Fizikai Tudományok Doktori Iskolája Fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásokban programjának keretében, a HUN-REN Atommagkutató Intézetének Izotópklimatológiai és Környezetkutató Központjában (IKER).

A kutatást az Európai Unió és Magyarország támogatta az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásában a GINOP-2.3.2-15-2016-00009 azonosítószerű 'IKER' pályázatban.

Bevezetés

A stroncium és ólom izotóparány meghatározásának kulcsfontosságú szerep jut a geológiában, geokémiában és a környezetkutatásban a kőzetek korának és eredetének meghatározása terén. Alkalmazásuk kiterjed más alkalmazott tudományterületekre is, mint például az archeológia, a környezetvédelem, az igazságügyi szakértői feladatok és az élelmiszeripar. A módszer sikere abban rejlik, hogy az egyes földrajzi területeknek egyedi, ujjlenyomatra emlékeztető stroncium és ólom izotóparánya van, amely a helyi geológiai viszonyoknak megfelelően változik. A stroncium izotópok közül a 86-os tömegszámú stroncium izotóp mennyisége állandó, míg a 87-es tömegszámú izotóp mennyisége folyamatosan növekszik. Ez a változás annak köszönhető, hogy a ^{87}Rb 49,7 milliárd éves felezési idővel ^{87}Sr -ra bomlik. A stroncium és a rubídium mikro- (0,1-1 m/m%), és nyomelemnyi (<0,1 m/m%) mennyiségben van jelen a talajokban és a kőzetekben. A különböző korú, eltérő genetikájú, ezért eltérő Rb/Sr koncentráció aránnyal rendelkező kőzetekben a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparány is változni fog. A K-ban gazdag kőzetekben, mint például a gránit nagyobb a Rb koncentrációja, így a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparánya is, míg a vele egyidős, de K-szegény bazaltoknál kisebb a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparánya. A $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparány egyaránt lehet indikátora a kőzetek korának és geokémiai eredetének is. A biológiai ciklusba belépve, a stroncium izotóp-összetétel nem csak a növényekben őrződik meg, hanem azon élő szervezetekben is, melyek ezeket fogyasztják. A vázszövetekben, a csontokban és fogakban a kalcium helyére beépülve, egyedi ujjlenyomatot képez, így lehetővé téve a népeségmozgások rekonstruálását, valamint a különbség tételt helyi és nem-helyi születésű egyének között.

A stroncium mellett az ólom izotóparánya is felhasználható a földrajzi eredet meghatározásában. Az alapkőzettől függően az egyes földrajzi területekre egyedi ólomizotóparány értékek jellemzőek. Ezeket az izotóparányokat az ólom négy izotópjának aránya adja. Stabil izotópjai közül a ^{204}Pb primordális, azaz nem keletkezik radioaktív

bomlás révén, a másik három, vagyis a ^{206}Pb , ^{207}Pb és ^{208}Pb rendre az ^{238}U , ^{235}U és a ^{232}Th radioaktív bomlási sorok végtermékei. Egy terület ólom izotóparánya a kőzetek kezdeti U, Th koncentrációjának és keletkezési korának a függvénye. Különböző területek között jelentős különbségek léphetnek fel ólom izotóparányukat tekintve, így alkalmasak lehetnek régészeti leletek, például ólom tartalmú kerámia mázak származási helyének meghatározására.

Dolgozatomban azt mutatom be, hogyan alkalmaztam hazánkban elsőként saját mérőberendezésen mért stroncium és ólom izotóparány eredményeket régészeti leletek és élelmiszeripari termékek földrajzi lelőhely területének behatárolása kapcsán. A kutatómunkám részét képezte az izotóparányok mérésére szolgáló analitikai módszerek kidolgozása és optimalizálása mellett roncsolási és mintatisztítási eljárások fejlesztése is eltérő mintatípusok (karbonát, talaj, élelmiszer és archeológiai lelet – kerámia tárgy, csont, fog) esetén. Magyarország teljes területéről vizsgáltam eper és hozzájuk tartozó talajmintákat stroncium izotóparányuk alapján. A feldolgozott eper és talajminták könnyebb átláthatósága céljából készült egy PoC (Proof of concept) webes alkalmazás, amely adatbázis az eredmények könnyebb átláthatósága, összesítése és a különböző területekről származó minták stroncium izotóparány eredményeinek összehasonlíthatósága céljából született. Elemeztem hat magyarországi borvidék, a pannonhalmi, villányi, tokaji, egri, kunsági és hajós-bajai borvidék borait, hogy feltérképezsem Magyarország borvidékeinek stroncium izotóparányát. Sikeresen alkalmaztam a stroncium izotóparány módszert régészeti leleteken (fog és csont) és geológiai (karbonát) mintákon. Elemeztem nagy ólom tartalmú kályhacsempék kerámiamázában az ólom izotóparányt, melyre kidolgoztam egy olyan minta-előkészítési módszert, mely nem roncsolja a leletet, egyszerű, gyors, eszköz és vegyszer igénye minimális, és a kapott ólom izotóparányok alapján megállapítottam a felhasznált ólom ércforrásának eredetét is.

Célkitűzések

1. Célul tűztem ki különböző minőségű (karbonát, talaj, élelmiszer és archeológiai lelet – kerámia tárgy, csont, fog) minták előkészítésének kifejlesztését, valamint stroncium és ólom tartalmának extrakciós kromatográfiás elválasztástechnikával történő szeparációjának kidolgozását. Célom volt, hogy megvalósítsam az előkészített minták nagy pontosságú izotóparány-mérését.
2. Az élelmiszeripar és mezőgazdaság területén megnövekedett igény alakult ki a termékek származási helyének azonosítása céljából mind a termelő, mind a fogyasztó részéről. Erre egy alkalmas módszer a termékek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparányának vizsgálata, mellyel meghatározható földrajzi eredetük. Célul tűztem ki Magyarország területeiről származó eper és talajminták $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparányának meghatározását és a feldolgozott eper, valamint talajminták könnyebb átláthatósága céljából egy POC (Proof of Concept) webes alkalmazás fejlesztését. Célul tűztem ki hat magyarországi borvidék borainak stroncium izotóparány meghatározását, hogy feltérképezsem Magyarországi borvidékeinek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparányát.
3. Célul tűztem ki $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparány vizsgálatának alkalmazását régészeti és geológiai mintákon.
4. Célul tűztem ki egy olyan roncsolásmentes és költséghatékony módszer kidolgozását, amely alkalmas nagy ólom tartalmú kerámia mázak festékanyagához használt ólom-oxid ólom izotóparányának vizsgálatára és az előállításához használt ólom földrajzi származásának azonosítására.

Vizsgálati módszerek

A doktori munkámhoz kapcsolódó stroncium és ólom izotóparány meghatározást a HUN-REN Atommagkutató Intézet (ATOMKI), Izotóp Klimatológiai és Környezetkutató Központjában (IKER) végeztem egy Thermo Scientific gyártmányú Neptune Plus multikollektoros induktív csatolású plazma ionforrású tömegspektrométeren. Az fizikai előkészítő-műveleteket, mint a szárítás, porítás, szitálás és passzírozás hagyományos kémiai laboratóriumban végeztem. A kémiai előkészítő-műveleteket, mint a minták savas roncsolása és extrakciós kromatográfiás elválasztása 1000-es tisztasági osztályú tisztatéri laboratóriumban végeztem.

Új tudományos eredmények

- 1. Minta-előkészítési és elválasztástechnikai módszerek kidolgozása különböző típusú (geológiai, környezeti, régészeti, valamint élelmiszer) minták stroncium és ólom izotóparányának nagy pontosságú tömegspektrometriás (MC-ICP-MS) meghatározására (P1, P2, P3).**

Meghonosítottam különböző minőségű (geológiai, környezeti, élelmiszeripari és archeológiai) minták előkészítését, extrakciós kromatográfiával történő elválasztástechnikáját. Sikerült elérni régészeti fog és csont minták, élelmiszeripari termékek, bor és eper, valamint geológiai karbonát minták, környezeti talajminták esetén 1 µg mennyiségű stronciumból történő nagy pontosságú <0,003% stroncium izotóparány méréstechnikát. Továbbá sikerült elérni régészeti kerámia mázagnál 1 µg mennyiségű ólomból történő ólom izotóparány mérést 0,01-0,2% relatív hibával.

- 2. Élelmiszerek származási helyének azonosítása a földieper és bor példáján stroncium izotóparányuk ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) jellemzésével (publikáció előkészületben).**

Megvizsgáltam negyven ismert magyarországi helységből származó eper mintát stroncium izotóparányukat tekintve. Feltérképeztem a magyar eprek stroncium izotóparány eloszlását, ami a következő tartományt fedi le: 0,70524 – 0,71157. Az eredményeket összevetettem szupermarketben és piacon vásárolt külföldi eredetű eper mintákkal, hogy a lokális eltéréseket kimutathassam a bennük mért stroncium izotóp-összetétel alapján. A külföldi minták stroncium izotóparány eredményei 0,70671 – 0,71015 tartományban mozognak. Az eredmények azt mutatják, hogy van olyan magyar eredetű eper minta, amely a külföldi jelölésű eper mintáktól bizonyosan megkülönböztethető. Az eredményekből készítettem egy PoC (Proof of concept) webes alkalmazást, mely az adatok könnyebb

átláthatósága, összesítése és a különböző területekről származó minták stroncium izotóparány eredményeinek összehasonlíthatósága céljából született. Jellemeztem hat magyarországi borvidéket stroncium izotóparányuk alapján. Ezek a következők voltak: Tokaji, Egri, Pannonhalmi, Villányi, Hajós-bajai és Kunsági borvidék. A Tokaji, Villányi és Egri borvidék stroncium-izotópösszetétele átfedést mutat egymással hasonló talajtani viszonyok miatt. Tőlük elkülöníthető a Pannonhalmi, Kunsági és Hajós-bajai borvidék bormintái. Három borvidék esetén (Tokaji, Pannonhalmi és Villányi) idősorokat is elemeztem. A Tokaji idősor mintáiban jelentős változás figyelhető meg, ami a szőlőültetvény újra telepítése miatt következett be.

3. Nagy pontosságú $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparány (MC-ICP-MS) vizsgálat alkalmazása régészeti leleteken és geológiai mintákon (P2, P3, P4, P5).

Sikeresen alkalmaztam $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparány módszert hamvasztásos temetkezésből származó régészeti csont és fog maradványokon, továbbá hosszas eltemetődés okozta diagenetikus átalakuláson átesett csont mintákon. A módszernek köszönhetően sikerült megállapítanom, hogy a vizsgált egyének az eltemetésének helyén vagy esetleg más, a lelőhellyel megegyező $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparánnyal rendelkező területen születtek és onnan költözött be.

Sikeresen alkalmaztam a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparány módszert felső-triász időszakból származó mészkőminták dolomitizációs folyamatának vizsgálatára a Keszthelyi-hegységben. Az eredmények jól illeszkednek a Korte által a Tethysi- és Germán-medencéből származó triász kori brachiopódákból és conodontákból mért értékek stroncium izotóparány görbéjére. Követik azt a globális dolomitizációs trendet, mely világszinten zajlott ebben az időszakban.

4. Minta-előkészítés és MC-ICP-MS módszer fejlesztése régészeti kerámiák nagy ólomtartalmú mázainak ólomizotóparány mérésére és a nyersanyagok forrásának meghatározására (P1).

Három minta-előkészítési módszert hasonlítottam össze egymással annak érdekében, hogy kiválasszam a leggyorsabb és legköltséghatékonyabb módszert nagy ólomtartalmú kerámia mázak ólom izotóparányának meghatározása céljából. A vizsgált három módszer közül a mintázási tamponnal történő felületi mintavételezés bizonyult a legalkalmasabbnak, mert gyors, eszköz és vegyszer fogyasztása minimális. További előnye a minta roncsolásmentes anyagvizsgálata. A kapott ólom izotóparány adatok alapján a mázak színezéséhez felhasznált ólom-oxid földrajzi eredetét tudtam meghatározni irodalmi ólom érctelepek ólom izotóparányával összevetve. A Kárpát-medence északi részéből származó egyedi, jó minőségű késő középkori Besztercebánya/Banská Bystrica típusú kályhacsempék magas ólom tartalmú mázának előállításához használt ólom erős átfedést mutat a krakkó-sziléziai bányavidék ólomérc lelőhelyeivel. Az importált ólmot tehát nemcsak a Szlovák Érchegeység területén bányászott rézércből az ezüst leválasztására szolgáló cseppfolyósítási folyamat során használták, hanem a legtöbb vizsgált kályhacsempé mázának gyártási folyamatához is. A Szlovák Érchegeységben bányászott ólomércet - Lengyelországból származó ólommal keverve - csak néhány csábrági/Čabraďi és ipolysági/Šahy-i kályhacsempé zöld mázában mutattam ki. Az Egerben feltárt kályhacsempék ólom izotóparánya hasonló a triász Bleiberg-típusú Pb-Zn érclelőhelyek ólom izotópadataihoz, ami az Ausztriából importált ólom lehetséges felhasználására utal.

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

P1. Horváth, A., Bajnóczi, B., Györkös, D., Palcsu, L. (2023). Comparison of rapid preparation methods for Pb isotope analysis of high-Pb ceramic glazes: A case study of late medieval Besztercebánya/Banská Bystrica-type stove tiles. *Archaeometry*.
IF: 1,915 D1

P2. Gugora, A., Demény, A., Fóthi, E., **Horváth, A.**, Palcsu, L., Karlik, M. (2022). Detection of diagenetic alteration in bones and teeth for migration and dietary studies – a combined FTIR and C-N-O-Sr isotope study on tenth century CE cemeteries in northern and northeastern Hungary. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 14: 4 paper 58. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01532-3>
IF: 2,213 Q1

P3. Haas, J., Budai, T., Hips, K., Czuppon, Gy., Győri, O., **Horváth, A.**, Héja, G. (2022). Dolomitization of Late Norian carbonate deposits of restricted basin facies in the Keszthely Mts., Transdanubian Range, Hungary. *International Journal of Earth Sciences*, 111 pp, 245-268., 24p, <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02113-w>
IF: 2,698 Q1

P4. Cavazzuti, C., Hajdu, T., Lugli, F., Sperduti, A., Vicze, M., **Horvath, A.**, Major, I., Molnár, M., Palcsu, L., Kiss, V. (2021). Human mobility in a Bronze Age Vatya 'urnfield' and the life history of a high-status woman. *PLOS ONE*, 16:7 Paper e0254360, 32p <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254360>
IF: 3,752 Q1

Magyar nyelvű tudományos közlemény könyvben (1)

P5. Horváth, A., Palcsu, L. (2021). Az Avar lovas eredetének vizsgálata stroncium izotóparány-méréssel. *A kagán lovasa Kiállítási katalógus*, Déri Múzeum Debrecen, 135-137, ISBN: 9786155560422

További közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (7)

1. Sipos, P., Kovács, I., Barna, Gy., Tóth, A., Makó, A., Palcsu, L., Kiss, G., **Horváth, A.,** Puskás-Presner, A. 2023, Iron isotope fractionation during the formation of ferromanganese nodules under different conditions of hydromorphism, *Geoderma* 430 Paper: 116286

2. Vargas, D., Pucha-Cofrep, D., Serrani-Vincenti, S., Burneo, A., Carlosama, L., Herrera, M., Cerna, M., Molnár, M., Jull, A.J.T., **Horváth, A.,** Temovski, M., László, E., Futó, I., Palcsu, L. 2022, ITCZ precipitation and cloud cover excursions control *Cedrela nebulosa* tree-ring oxygen and carbon isotopes in the northwestern Amazon, *Global and Planetary Change* 211 p :103791

3. Major, I., Furu, E., Varga, T., **Horváth, A.,** Futó, I., Gyökös, B., Somodi, G., Lisztes-Szabó, Zs., Jull, A.J.T., Kerész, Zs., Molnár, M. 2021, Source identification of PM2.5 carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary, 2021, *Science of the Total Environment* 782p: 146520

4. van Gend, J., Francis, M.L., Watson, A.P., Palcsu, L., **Horváth, A.,** Macey, P.H., le Roux, P. Clarke, C.E., Miller, J.A. 2021, Saline groundwater in the Buffels River catchment, Namaqualand, South Africa: A new look at an old problem, *Science of the Total Environment* 762 p.: 143140

5. Turi, M., Molnár, M., Orehova, T., Hristov, V., Benderev, A., **Horváth, A.**, Palcsu, L. 2021, Tracing groundwater recharge conditions based on environmental isotopes and noble gases, Lom depression, Bulgaria, Journal of Hydrology: Regional Studies 24p.: 100611 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100611>

6. Palcsu L., Koltai G., **Horváth A.**, Baran I., Halas S. 2017 Stable isotope and noble gas constrains on the genesis of therapeutic waters in southeast Poland, Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences 12: 1pp. 225-233., 9p.

7. Turi M., Palcsu L., Papp L., **Horváth A.**, Futó I., Molnár M., Rinyu L., Janovics R., Braun M., Hubay K. 2016, Isotope Characteristics of the water and sediment in volcanic lake Saint Ana, East-Carpathians, Romania, Carpathian Journal of the Earth nad Environmental Sciences 11., 2pp. 475-484., 10p.



Nyilvántartási szám: DEENK/356/2024.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Horváth Anikó
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10062447

A PhD értekezés alapiául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű könyvrészletek (1)

1. **Horváth, A.**, Palcsu, L.: Az avar lovas eredetének vizsgálata stroncium izotóparányméréssel.
In: A kagán lovasa : Kiállítási katalógus /szerk. Dani János, Hága Tamara Katalin, Déri Múzeum, Debrecen, 135-137, 2021. ISBN: 9786155560422

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

2. **Horváth, A.**, Bajnóczy, B., Györkös, D., Palcsu, L.: Comparison of rapid preparation methods for Pb isotope analysis of high-Pb ceramic glazes: A case study of late medieval Besztercebanya/Banská Bystrica-type stove tiles.
Archaeometry, 65 (5), 1004-1017, 2023. ISSN: 0003-813X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/arcm.12872>
IF: 1.6 (2022)
3. Gugora, A., Demény, A., Fóthi, E., **Horváth, A.**, Palcsu, L., Karlik, M.: Detection of diagenetic alteration in bones and teeth for migration and dietary studies ? a combined FTIR and C-N?O-Sr isotope study on tenth century CE cemeteries in northern and northeastern Hungary.
Archaeol. Anthropol. Sci. 14 (4), 1-13, 2022. ISSN: 1866-9557.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12520-022-01532-3>
IF: 2.2
4. Haas, J., Budai, T., Hips, K., Czuppon, G., Györi, O., **Horváth, A.**, Héja, G.: Dolomitization of Late Norian carbonate deposits of restricted basin facies in the Keszthely Mts., Transdanubian Range, Hungary.
Int. J. Earth Sci. 111 (1), 245-268, 2021. ISSN: 1437-3254.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-021-02113-w>
IF: 2.698
5. Cavazzuti, C., Hajdu, T., Lugli, F., Sperduti, A., Vicze, M., **Horváth, A.**, Major, I., Molnár, M., Palcsu, L., Kiss, V.: Human mobility in a Bronze Age Vatya 'urnfield' and the life history of a high-status woman.
PLoS One, 16 (7), 1-32, 2021. ISSN: 1932-6203.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0254360>
IF: 3.752





További közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (8)

6. Heszler, B., Katchinoff, J., Palcsu, L., **Horváth, A.**, Vallner, Z., Kovács, E. B., Planavsky, N., Páffy, J.: Marine Strontium Isotope Evolution at the Triassic-Jurassic Transition Links Transient Changes in Continental Weathering to Volcanism of the Central Atlantic Magmatic Province. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 25 (3), 1-21, 2024. ISSN: 1525-2027.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2024GC011464>
IF: 3.5 (2022)
7. Gerber, D., Szeifert, B., Székely, O., Egyed, B., Gyuris, B., Giblin, J. I., **Horváth, A.**, Köhler, K., Kulcsár, G., Kustár, Á., Major, I., Molnár, M., Palcsu, L., Szeverényi, V., Fábíán, S., Mende, B. G., Bondár, M., Ari, E., Kiss, V., Szécsényi-Nagy, A.: Interdisciplinary Analyses of Bronze Age Communities from Western Hungary Reveal Complex Population Histories. *Mol. Biol. Evol.* 40 (9), 1-14, 2023. ISSN: 0737-4038.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/molbev/msad182>
IF: 10.7 (2022)
8. Sipos, P., Kovács, I., Barna, G., Tóth, A., Makó, A., Palcsu, L., Kiss, G. I., **Horváth, A.**, Puskás-Preszner, A.: Iron isotope fractionation during the formation of ferromanganese nodules under different conditions of hydromorphism. *Geoderma.* 430, 1-13, 2023. ISSN: 0016-7061.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116286>
IF: 6.1 (2022)
9. Gasparik, M., Major, I., Lisztes-Szabó, Z., Magyar, E., Szabó, B., Pandolfi, L., Borel, A., Futó, I., **Horváth, A.**, Kiss, G. I., Molnár, M., Csik, A., Markó, A.: Multi-disciplinary study of a late Pleistocene woolly rhinoceros found in the Pannonian Basin and implications for the contemporaneous palaeoenvironment. *J. Quat. Sci.* 38 (7), 1159-1170, 2023. ISSN: 0267-8179.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jqs.3533>
IF: 2.3 (2022)
10. Vargas Espin, D. F., Pucha-Cofrep, D., Serrano-Vincenti, S., Burneo, A., Carlosama, L., Herrera, M., Cerna, M., Molnár, M., Jull, A. J. T., Temovski, M., László, E., Futó, I., **Horváth, A.**, Palcsu, L.: ITCZ precipitation and cloud cover excursions control Cedrela nebulosa tree-ring oxygen and carbon isotopes in the northwestern Amazon. *Glob. Planet. Change.* 211, 1-15, 2022. ISSN: 0921-8181.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103791>
IF: 3.9





11. Major, I., Furu, E., Varga, T., **Horváth, A.**, Futó, I., Gyökös, B., Somodi, G., Lisztes-Szabó, Z., Jull, A. J. T., Kertész, Z., Molnár, M.: Source identification of PM2.5 carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary.
Sci. Total Environ. 782, 1-12, 2021. ISSN: 0048-9697.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146520>
IF: 10.753
12. Túri, M., Molnár, M., Orehova, T., Toteva, A., Hristov, V., Benderev, A., **Horváth, A.**, Palcsu, L.: Tracing groundwater recharge conditions based on environmental isotopes and noble gases, Lom depression, Bulgaria.
Journal of Hydrology: Regional Studies. 24, 1-15, 2019. ISSN: 2214-5818.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100611>
IF: 3.645
13. Túri, M., Palcsu, L., Papp, L., **Horváth, A.**, Futó, I., Molnár, M., Rinyu, L., Janovics, R., Braun, M., Hubay, K., Kis, B. M., Koltai, G.: Isotope Characteristics of the water and sediment in volcanic lake Saint Ana, East-Carpathians, Romania.
Carpath. J. Earth Environ. Sci. 11 (2), 475-484, 2016. ISSN: 1842-4090.
IF: 0.88

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

14. Vargas Espin, D. F., Pucha-Cofrep, D., Burneo, A., Carlosama, L., Herrera, M., Serrano, S., Cerna, M., Jull, A. J. T., Molnár, M., Futó, I., **Horváth, A.**, Temovski, M., Palcsu, L.: Impact of cloud coverage on growth dynamics of Cedrela nebulosa from an Amazonian pre-montane forest in Central Ecuador.
In: CL1.24 Interdisciplinary Tree-ring research. Ed.: Kerstin Treydte, Flurin Babst, Giovanna Battipaglia, Jan Esper, EGU General Assembly, [Vienna], 1, 2020.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 52,028

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 10,25

A DEENK a Jeliőt által az iDEA Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudománymetriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2024.06.13.



Short thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

**The application of strontium and lead isotope ratios in the
identification of food products and archaeological artefacts**

by Anikó Horváth

Supervisor: Dr. László Palcsu



UNIVERSITY OF DEBRECEN

Doctoral School of Physics

Debrecen, 2024

Prepared at

the Doctoral School of Physics, University of Debrecen and the *Isotope Climatology and Environmental Research Centre (ICER)* of the HUN-REN Institute for Nuclear Research.

The research was supported by the European Union and the State of Hungary, co-financed by the European Regional Development Fund in the project of GINOP-2.3.2-15-2016-00009 'ICER'.

Introduction

The determination of the isotope ratios of strontium and lead plays a key role in geology, geochemistry and environmental research, especially for age calculation and the origin of rocks. Their application has also extended to other applied sciences such as archaeology, environmental protection, forensic science and food industry. The success of the method lies in the fact that each geographical area has a unique strontium and lead isotopic ratio, resembling a fingerprint, which varies according to local geological conditions. Among the strontium isotopes, the amount of strontium isotope with mass number 86 is constant, while the amount of strontium isotope with mass number 87 increases. This change is due to the decay of ^{87}Rb to ^{87}Sr with a half-life of 49.7 billion years. Strontium and rubidium are present in micro (0.1-1% m/m) and trace amounts (<0.1% m/m) in soils and rocks. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios will also vary in rocks of different ages, with different genetics and therefore different Rb/Sr concentration ratios, so that K-rich rocks such as granite will have higher Rb concentrations and hence $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios than the same-aged but K-poor basalt. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio can be an indicator of both the age and geochemical origin of the rocks. Entering the biological cycle, the strontium isotopic composition is not only conserved in plants but also in the organisms that consume them. Incorporated into skeletal tissues, bones and teeth, it forms a unique fingerprint, allowing the reconstruction of population movements and the differentiation between local and non-local born individuals. In addition to strontium, the isotopic ratio of lead can also be used to determine geographical origin. Depending on the bedrock, specific lead isotopic ratios are typical for each geographical area. These isotope ratios are given by the ratio of the four isotopes of lead. Of its stable isotopes, ^{204}Pb is primordial, i.e., not produced by radioactive decay, while the other three, ^{206}Pb , ^{207}Pb and ^{208}Pb , are normally the end products of radioactive decay series ^{238}U , ^{235}U and ^{232}Th . The isotopic ratio of lead in an area is a function of the initial U and Th concentration and the age of formation

of the rocks. There can be significant differences in the lead isotope ratios between different areas, making them suitable for determining the provenance of archaeological artefacts such as lead-containing ceramic glazes.

In my thesis I will present how I have applied the results of strontium and lead isotope ratios carried out on a Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (MC-ICP-MS) for the first time in Hungary to delimit the geographical area of archaeological findings and food products. In addition to the development and optimisation of analytical methods for measuring isotope ratios, my research also included the development of destructive and sample cleaning procedures for different sample types (carbonate, soil, food and archaeological finds - ceramic objects, bone, teeth).

I analysed strawberries and their soil samples covering the Hungarian territory according to their strontium isotope ratios. A Proof of Concept (PoC) web application was created to facilitate the transparency of the processed strawberry and soil samples, and for the reproducibility and comparison of the strontium isotope ratio of the samples from different areas. Furthermore, I analysed wines from six Hungarian wine regions, Pannonhalma, Villány, Tokaj, Eger, Kunság and Hajós-Baja, to map the strontium isotope ratios in the country. Finally, I successfully applied the strontium isotope ratio method on archaeological (tooth and bone) and geological (carbonate) samples. I analysed the lead isotope ratios in ceramic glazes of stove tiles with high lead content. I have developed a sample preparation method that is simple, fast, non-destructive and requires minimal tools and chemicals, and determined the origin of the ore source of the lead based on the obtained lead isotope ratios.

Objectives

1. My general objective was to develop the preparation method for various sample types (carbonate, soil, food and archaeological finds - ceramics, bone, tooth), and the separation of strontium and lead content by extraction chromatography. My goal was to achieve accurate isotope ratio measurements of the prepared samples.
2. In the food and agricultural sectors, there is an increased demand for the identification of the origin of products, both from the producer and the consumer. A suitable method is the analysis of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio of products to determine their geographical origin. My aim was to determine the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios of strawberry and soil samples from several areas in Hungary and to develop a PoC (Proof of Concept) web application for easier transparency of processed strawberry and soil samples. Similarly, I aimed to establish the strontium isotope ratios of wines from six wine regions in Hungary in order to map the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios of these regions.
3. For archaeological and geological samples, I aimed to apply $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio analysis.
4. I worked to develop a non-destructive and cost-effective method for the determination of the lead oxide isotope ratio used in the production of high lead ceramic glazes and to identify their geographical provenance.

Materials and methods

The determination of strontium and lead isotope ratios for my PhD thesis was carried out at the HUN-REN Institute for Nuclear Research (ATOMKI), Isotope Climatology and Environmental Research Centre (ICER) on a Thermo Scientific Neptune Plus multicollector inductively coupled plasma ion source mass spectrometer. The physical preparation operations such as drying, pulverizing, sieving and passivation were carried out in a conventional chemical laboratory. Chemical preparation operations such as acid digestion and extraction chromatographic separation of samples were performed in a clean room laboratory of purity class 1000.

New scientific results

1. Development of sample preparation and separation techniques for the determination of strontium and lead isotope ratios in different types of samples (geological, environmental, archaeological and food) by high precision mass spectrometry (MC-ICP-MS) (P1, P2, P3).

I have validated the preparation and separation techniques using extraction chromatography of samples of different types (archaeological, geological, environmental, and food) in a Class 1000 clean room laboratory. Achieved high precision $<0.003\%$ strontium isotopic ratio measurements of $1\ \mu\text{g}$ of strontium from archaeological (tooth and bone), food products (wine and strawberry), geological (carbonate), and environmental (soil) samples. Furthermore, a lead isotope ratio measurement of $1\ \mu\text{g}$ of lead in archaeological ceramic glazes was achieved with a relative error of 0.01-0.2%.

2. Development of strontium isotopic ratio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) analysis method for the identification of food origin in strawberries and wine (in preparation).

I analysed strawberry samples from forty known localities in Hungary for their strontium isotope ratios. I mapped the distribution of the strontium isotope ratios of Hungarian strawberries, which cover the following range: 0.70524 - 0.71157. I compared the results with strawberry samples of foreign origin purchased in supermarkets and markets to detect local differences in the strontium isotope ratios measured in them. The strontium isotope ratio results of the foreign samples range from 0.70671 to 0.71015. The results show that there are strawberry samples of Hungarian origin which can be distinguished from foreign strawberry samples. From the results, I have created a PoC (Proof of Concept) web application for easier data transparency, aggregation and comparability of strontium isotope ratio results of samples from different regions. I characterised six wine regions in Hungary based on their

strontium isotope ratios. These were Tokaj, Egri, Pannonhalmi, Villány, Hajós-baja and Kunság wine regions. The strontium isotopic composition of the Tokaj, Villány and Egri wine regions overlapped due to similar soil conditions. The wine samples of the Pannonhalmi, Kunság and Hajós-baja wine regions can be distinguished from them. I also analysed time series for three wine regions (Tokaj, Pannonhalmi and Villány). In the Tokaji time series, a significant change in the samples was observed due to the replanting of the vineyard.

3. High precision $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio (MC-ICP-MS) analysis of archaeological findings and geological samples (P2, P3, P4, P5).

I have successfully applied the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio method to archaeological bone and tooth remains from cremation burials and to bone samples that have undergone diagenetic transformation due to prolonged burial. Using this method, I was able to determine whether the individuals studied were born in and moved from the burial site or possibly from another area with the same $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic abundance as the burial site.

I have successfully applied the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio method to study the dolomitisation process of limestone samples from the Upper Triassic period in the Keszthelyi Mountains. The results fit well with the strontium isotopic ratio curve of Korte's measurements from Triassic brachiopods and conodonts from the Tethys and Germanic basins. They follow the global trend of dolomatization that took place worldwide during this period.

4. Development of a sample preparation and MC-ICP-MS method to measure the lead isotope ratio of high lead glazes in archaeological ceramics and to determine the source of raw materials (P1).

Three sample preparation methods were compared to each other in order to select the fastest and most cost-effective method for determining the lead isotope ratios of high lead ceramic glazes. Of the three methods investigated, surface sampling with a sampling swab was found to be the most suitable because it is rapid and consumes minimal equipment and chemicals. An additional advantage is the non-destructive material analysis of the sample. Based on the lead isotope ratio data obtained, I was able to determine the geographic origin of the lead oxide used for staining the glazes by comparing it with the lead isotope ratios of lead ore deposits in the literature. The lead used for the production of high lead glazes for the unique, high quality late medieval Besztercebánya/Banská Bystrica type stove tiles from the northern part of the Carpathian Basin showed a strong overlap with lead ore deposits from the Krakow-Silesian mining district. Imported lead was therefore used not only in the liquifaction process for the separation of silver from copper ore mined in the Slovak Ore Mines, but also in the production process of most of the stove tile glazes examined. Lead ore mined in the Slovak Ore Mountains, mixed with lead from Poland, was only detected in the green glazes of some stove tiles from csábrági/Čabrad'i and ipolysági/Šahy-i. The lead isotope ratios of the stove tiles excavated in Eger are similar to the lead isotope ratios of the Triassic Bleiberg-type Pb-Zn ore deposits, suggesting a possible use of lead imported from Austria.

Publication list

Scientific papers related to the dissertation

Publications in referred journals

P1. Horváth, A., Bajnóczi, B., Györkös, D., Palcsu, L. (2023). Comparison of rapid preparation methods for Pb isotope analysis of high-Pb ceramic glazes: A case study of late medieval Besztercebánya/Banská Bystrica-type stove tiles. *Archaeometry*.
IF: 1.915 D1

P2. Gugora, A., Demény, A., Fóthi, E., **Horváth, A.**, Palcsu, L., Karlik, M. (2022). Detection of diagenetic alteration in bones and teeth for migration and dietary studies – a combined FTIR and C-N-O-Sr isotope study on tenth century CE cemeteries in northern and northeastern Hungary. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 14: 4 paper 58. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01532-3>
IF: 2.213 Q1

P3. Haas, J., Budai, T., Hips, K., Czuppon, Gy., Győri, O., **Horváth, A.**, Héja, G. (2022). Dolomitization of Late Norian carbonate deposits of restricted basin facies in the Keszthely Mts., Transdanubian Range, Hungary. *International Journal of Earth Sciences*, 111 pp, 245-268., 24p, <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02113-w>
IF: 2.698 Q1

P4. Cavazzuti, C., Hajdu, T., Lugli, F., Sperduti, A., Vicze, M., **Horvath, A.**, Major, I., Molnár, M., Palcsu, L., Kiss, V. (2021). Human mobility in a Bronze Age Vatya 'urnfield' and the life history of a high-status woman. *PLOS ONE*, 16:7 Paper e0254360, 32p <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254360>
IF: 3.752 Q1

P5. Horváth, A., Palcsu, L. (2021). Az Avar lovas eredetének vizsgálata stroncium izotóparányméréssel. *A kagán lovasa Kiállítási katalógus*, Déri Múzeum Debrecen, 135-137, ISBN: 9786155560422

Other publications (not related to the dissertation)

Publications in referred journals

1. Sipos, P., Kovács, I., Barna, Gy., Tóth, A., Makó, A., Palcsu, L., Kiss, G., **Horváth, A.**, Puskás-Presner, A. 2023, Iron isotope fractionation during the formation of ferromanganese nodules under different conditions of hydromorphism, *Geoderma* 430 Paper: 116286

2. Vargas, D., Pucha-Cofrep, D., Serrani-Vincenti, S., Burneo, A., Carlosama, L., Herrera, M., Cerna, M., Molnár, M., Jull, A.J.T., **Horváth, A.**, Temovski, M., László, E., Futó, I., Palcsu, L. 2022, ITCZ precipitation and cloud cover excursions control *Cedrela nebulosa* tree-ring oxygen and carbon isotopes in the northwestern Amazon, *Global and Planetary Change* 211 p :103791

3. Major, I., Furu, E., Varga, T., **Horváth, A.**, Futó, I., Gyökös, B., Somodi, G., Lisztes-Szabó, Zs., Jull, A.J.T., Kerész, Zs., Molnár, M. 2021, Source identification of PM2.5 carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary, 2021, *Science of the Total Environment* 782p: 146520

4. van Gend, J., Francis, M.L., Watson, A.P., Palcsu, L., **Horváth, A.**, Macey, P.H., le Roux, P. Clarke, C.E., Miller, J.A. 2021, Saline groundwater in the Buffels River catchment, Namaqualand, South Africa: A new look at an old problem, *Science of the Total Environment* 762 p.: 143140

5. Turi, M., Molnár, M., Orehova, T., Hristov, V., Benderev, A., **Horváth, A.**, Palcsu, L. 2021, Tracing groundwater recharge conditions based on environmental isotopes and noble gases, Lom depression, Bulgaria, Journal of Hydrology: Regional Studies 24p.: 100611 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100611>

6. Palcsu L., Koltai G., **Horváth A.**, Baran I., Halas S. 2017 Stable isotope and noble gas constrains on the genesis of therapeutic waters in southeast Poland, Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences 12: 1pp. 225-233., 9p.

7. Turi M., Palcsu L., Papp L., **Horváth A.**, Futó I., Molnár M., Rinyu L., Janovics R., Braun M., Hubay K. 2016, Isotope Characteristics of the water and sediment in volcanic lake Saint Ana, East-Carpathians, Romania, Carpathian Journal of the Earth nad Environmental Sciences 11., 2pp. 475-484., 10p.



Registry number: DEENK/356/2024.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Anikó Horváth
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10062447

List of publications related to the dissertation

Hungarian book chapters (1)

1. **Horváth, A.**, Palcsu, L.: Az avar lovas eredetének vizsgálata stroncium izotóparány-méréssel.
In: A kagán lovasa : Kiállítási katalógus /szerk. Dani János, Hága Tamara Katalin, Déri Múzeum, Debrecen, 135-137, 2021. ISBN: 9786155560422

Foreign language scientific articles in international journals (4)

2. **Horváth, A.**, Bajnóczi, B., Györkös, D., Palcsu, L.: Comparison of rapid preparation methods for Pb isotope analysis of high-Pb ceramic glazes: A case study of late medieval Besztercebanya/Banská Bystrica-type stove tiles.
Archaeometry, 65 (5), 1004-1017, 2023. ISSN: 0003-813X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/arcm.12872>
IF: 1.6 (2022)
3. Gugora, A., Demény, A., Fóthi, E., **Horváth, A.**, Palcsu, L., Karlik, M.: Detection of diagenetic alteration in bones and teeth for migration and dietary studies ? a combined FTIR and C-N/O-Sr isotope study on tenth century CE cemeteries in northern and northeastern Hungary.
Archaeol. Anthropol. Sci. 14 (4), 1-13, 2022. ISSN: 1866-9557.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12520-022-01532-3>
IF: 2.2
4. Haas, J., Budai, T., Hips, K., Czuppon, G., Györi, O., **Horváth, A.**, Héja, G.: Dolomitization of Late Norian carbonate deposits of restricted basin facies in the Keszthely Mts., Transdanubian Range, Hungary.
Int. J. Earth Sci. 111 (1), 245-268, 2021. ISSN: 1437-3254.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-021-02113-w>
IF: 2.698
5. Cavazzuti, C., Hajdu, T., Lugli, F., Sperduti, A., Vicze, M., **Horváth, A.**, Major, I., Molnár, M., Palcsu, L., Kiss, V.: Human mobility in a Bronze Age Vatya 'urnfield' and the life history of a high-status woman.
PLoS One. 16 (7), 1-32, 2021. ISSN: 1932-6203.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0254360>
IF: 3.752





List of other publications

Foreign language scientific articles in international journals (8)

6. Heszler, B., Katchinoff, J., Palcsu, L., **Horváth, A.**, Vallner, Z., Kovács, E. B., Planavsky, N., Pálffy, J.: Marine Strontium Isotope Evolution at the Triassic-Jurassic Transition Links Transient Changes in Continental Weathering to Volcanism of the Central Atlantic Magmatic Province. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 25 (3), 1-21, 2024. ISSN: 1525-2027.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2024GC011464>
IF: 3.5 (2022)
7. Gerber, D., Szeifert, B., Székely, O., Egyed, B., Gyuris, B., Giblin, J. I., **Horváth, A.**, Köhler, K., Kulcsár, G., Kustár, Á., Major, I., Molnár, M., Palcsu, L., Szeverényi, V., Fábiani, S., Mende, B. G., Bondár, M., Ari, E., Kiss, V., Szécsényi-Nagy, A.: Interdisciplinary Analyses of Bronze Age Communities from Western Hungary Reveal Complex Population Histories. *Mol. Biol. Evol.* 40 (9), 1-14, 2023. ISSN: 0737-4038.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/molbev/msad182>
IF: 10.7 (2022)
8. Sipos, P., Kovács, I., Barna, G., Tóth, A., Makó, A., Palcsu, L., Kiss, G. I., **Horváth, A.**, Puskás-Preszner, A.: Iron isotope fractionation during the formation of ferromanganese nodules under different conditions of hydromorphism. *Geoderma.* 430, 1-13, 2023. ISSN: 0016-7061.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116286>
IF: 6.1 (2022)
9. Gasparik, M., Major, I., Lisztes-Szabó, Z., Magyar, E., Szabó, B., Pandolfi, L., Borel, A., Futó, I., **Horváth, A.**, Kiss, G. I., Molnár, M., Csik, A., Markó, A.: Multi-disciplinary study of a late Pleistocene woolly rhinoceros found in the Pannonian Basin and implications for the contemporaneous palaeoenvironment. *J. Quat. Sci.* 38 (7), 1159-1170, 2023. ISSN: 0267-8179.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jqs.3533>
IF: 2.3 (2022)
10. Vargas Espin, D. F., Pucha-Cofrep, D., Serrano-Vincenti, S., Burneo, A., Carlosama, L., Herrera, M., Cerna, M., Molnár, M., Jull, A. J. T., Temovski, M., László, E., Futó, I., **Horváth, A.**, Palcsu, L.: ITCZ precipitation and cloud cover excursions control *Cedrela nebulosa* tree-ring oxygen and carbon isotopes in the northwestern Amazon. *Glob. Planet. Change.* 211, 1-15, 2022. ISSN: 0921-8181.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103791>
IF: 3.9





11. Major, I., Furu, E., Varga, T., **Horváth, A.**, Futó, I., Gyökös, B., Somodi, G., Lisztes-Szabó, Z., Jull, A. J. T., Kertész, Z., Molnár, M.: Source identification of PM_{2.5} carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary.
Sci. Total Environ. 782, 1-12, 2021. ISSN: 0048-9697.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146520>
IF: 10.753
12. Türi, M., Molnár, M., Orehova, T., Toteva, A., Hristov, V., Benderev, A., **Horváth, A.**, Palcsu, L.: Tracing groundwater recharge conditions based on environmental isotopes and noble gases, Lom depression, Bulgaria.
Journal of Hydrology: Regional Studies. 24, 1-15, 2019. ISSN: 2214-5818.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100611>
IF: 3.645
13. Türi, M., Palcsu, L., Papp, L., **Horváth, A.**, Futó, I., Molnár, M., Rinyu, L., Janovics, R., Braun, M., Hubay, K., Kis, B. M., Koltai, G.: Isotope Characteristics of the water and sediment in volcanic lake Saint Ana, East-Carpathians, Romania.
Carpath. J. Earth Environ. Sci. 11 (2), 475-484, 2016. ISSN: 1842-4090.
IF: 0.88

Foreign language abstracts (1)

14. Vargas Espin, D. F., Pucha-Cofrep, D., Burneo, A., Carlosama, L., Herrera, M., Serrano, S., Cerna, M., Jull, A. J. T., Molnár, M., Futó, I., **Horváth, A.**, Temovski, M., Palcsu, L.: Impact of cloud coverage on growth dynamics of *Cedrela nebulosa* from an Amazonian pre-montane forest in Central Ecuador.
In: CL1.24 Interdisciplinary Tree-ring research. Ed.: Kerstin Treydte, Flurin Babst, Giovanna Battipaglia, Jan Esper, EGU General Assembly, [Vienna], 1, 2020.

Total IF of journals (all publications): 52,028

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 10,25

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

13 June, 2024

