

A prompt-gamma aktivációs analízis alkalmazása szilikát anyagú régészeti leletek és nyersanyagaik eredetének meghatározására

MTA doktori értekezés tézisei

Kasztovszky Zsolt

Energiatudományi Kutatóközpont



2023

Bevezetés

A prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA) a sugárzásos neutronbefogáson, az (n,γ) reakción alapuló nukleáris elemanalitikai módszer. A magfizikai jelenséget már az 1930-as években felfedezték, az első elemanalitikai kísérleteket azonban csak az 1960-as évek végén, az 1970-es évek elején végezték el Saclay-ben, Grenoble-ban, ill. a Massachusetts Institute of Technology-n.

A Budapesti Kutatóreaktornál, az MTA Izotópkutató Intézetben néhai Molnár Gábor és munkatársai 1995–96-ban építették meg a PGAA-mérőhelyet. A kvantitatív elemzést lehetővé tevő ún. prompt k_0 -módszert Révay Zsolt dolgozta ki. Az első hazai PGAA-mérések 1996 őszén kezdődtek. Ekkor a budapesti volt Európában az egyetlen működő PGAA-berendezés. Európán kívül az 1990-es években a japán JAERI és az egyesült államokbeli NIST PGAA-laborjaiban folytak számottevő alkalmazott kutatások. A németországi FRMII-ben 2007 óta üzemel PGAA labor.

A PGAA módszer egyedülálló tulajdonsága, hogy a neutronok nagy áthatoló képessége következtében a tárgyak átlagos tömbi („bulk”) összetételéről szolgáltat adatokat. A PGAA-val elvileg minden kémiai elem kimutatható, több nagyságrendet átfogó érzékenységgel. A vizsgálandó mintát egy, a neutronforrástól elvezetett nyalábba helyezzük, így a vizsgálható tárgy mérete kevésbé korlátozott, nagyobb tárgyakból sem szükséges mintát venni. A neutronnyalábok viszonylag kis (10^6 – 10^9 $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) intenzitása miatt a mintákban nem történik sem makroszkopikus, sem mikroszkopikus károsodás, az indukált radioaktivitás gyorsan lecseng.

Az örökségtudomány (angolul „*heritage science*”) célkitűzése, a tárgyi emlékeink elemzése és megőrzése a jövő nemzedékek számára, napjainkban kiemelt helyen szerepel Európa és az egész világ tudományos feladatai között. A fenti tulajdonságai révén a PGAA kiválóan alkalmas értékes, egyedi minták, pótolhatatlan kulturális és természeti kincseink, például régészeti leletek örökségtudományi (archeometriai) vizsgálatára. Mivel a geológiai eredetű mintákban a legtöbb főelem és néhány nyomelem roncsolásmentesen mérhető PGAA-val, a módszer jól alkalmazható a provenienciakutatásban, azaz a régészeti leletek nyersanyagainak eredetmeghatározásában. A PGAA-t elsőként az 1980-as és 1990-es években alkalmazta M. D. Glascock, Y. Oura és D. L. Anderson az archeometriában, kezdeti kísérleteiket azonban nem követték szisztematikus vizsgálatok. A BNC-ben 1996-ban indult PGAA-mérések során a lehetséges alkalmazások közül munkatársaimmal elsőként foglalkoztunk az archeometriai alkalmazások lehetőségével.

Célkitűzések

Értekezésemben a PGAA alkalmazhatóságát vizsgáltam szilikát anyagú régészeti leletek (kőeszközök, féldrágakövek, üvegek) archeometriai vizsgálatára, elsősorban provenienckiutatásra. 1997-től – együttműködésben az MTA Régészeti Intézetével, a Magyar Nemzeti Múzeummal és az ELTE Közettan-Geokémiai Tanszékével – Magyarországon elsőként végeztem szisztematikus PGAA-méréseket különböző kőzetekből (obszidián, kovakőzetek, metamorf kőzetek), lápisz lazuliból, üvegből, valamint réz- és ezüsttövezetekből, kerámiából készült régészeti tárgyak nagyszámú sorozatain. 2023-ig munkatársaimmal közösen összesen több mint **6100** archeometriai tárgyú PGAA-elemzést végeztünk, az egyes anyagfajtákra jelentős PGAA-adatbázisokat hoztunk létre, amelyekre számos jelenlegi hazai és nemzetközi régészeti kutatási projekt támaszkodik.

Az elmúlt 25 évben a budapesti PGAA-laboratórium mind a hazai, mind a nemzetközi tudományos életben elismertségre tett szert az archeometriai kutatások terén. Részvételemmel vagy vezetésemmel számos hazai és nemzetközi örökségtudományi tárgyú projektben (OTKA/NKFIH, Tét, ANCIENT CHARM, CHARISMA, IPERION CH, IPERION HS, E-RIHS, IAEA CRP) vettünk részt. Tudomásunk szerint a budapesti az egyetlen, PGAA-t hosszú távú örökségtudományi kutatásokban alkalmazó laboratórium a világon.

Módszertan

Az értekezésben ismertetett kutatások fő kísérleti módszere a prompt-gamma aktivációs analízis volt. A módszer alkalmazhatóságát szilikát anyagú régészeti minták provenienckiutatásában nemzetközi referenciaminták (standardok) mérésével vizsgáltam [T1].

Az obszidiánok esetében riolit, a csiszolt kőeszközök esetében bazalt és andezit, az üveg leletek esetében különböző régészeti üvegtípusokat reprezentáló nemzetközi referenciaminták mérésével meghatároztam a PGAA-val kimutatható összetevőket, valamint összehasonlítottam az ismeretlen minták összetevőinek várható koncentráció-tartományát a PGAA mérőrendszer kimutatási határaival [T1]. A provenienckiavizsgálatokhoz a PGAA-adatokból kétváltozós diagramokat készítettem, ill. főkomponens analízist (PCA-t) végeztem a minták összehasonlítására. Fontos megjegyezni, hogy a PGAA csak meghatározott archeometriai kérdésekben, elsősorban a szervesetlen anyagok vizsgálatára alkalmazható hatékonyan, és nem tekinthető kizárólagos vizsgálati módszernek. Kiegészítő módszerként továbbra is fontos szerepe van pl. az XRF- és ionnyaláb-technikáknak, az ICP-MS-nek, vagy a hagyományos optikai és elektronmikroszkópiának. Az elért eredményeim az alábbi tézispontokban foglalom össze.

Új tudományos eredmények

I. Téma: Pattintott kőeszközök vizsgálata

1. Tézispont. Összesen 165 mintából álló, a leggyakrabban előforduló pattintott kőeszköz nyersanyagtípusokat (kovakőzetet (silex), kvarcporfírt ill. az obszidiánt) reprezentáló sorozatot vizsgálva megállapítottam, hogy a PGAA nagy megbízhatósággal alkalmas a fő nyersanyagtípusok elkülönítésére, elsősorban a minták SiO_2 -, TiO_2 -, Na_2O - és Fe_2O_3 -tartalma alapján. A PGAA olyan esetben is helyes azonosítást tesz lehetővé, amikor makroszkópos vizsgálatokkal (vizuális megfigyeléssel) nem lehetséges pl. a kvarcporfir és a kovakőzetek, vagy az obszidián és a modern kohósalak megkülönböztetése [T2-4].

2. Tézispont. A fő európai obszidián nyersanyaglelőhelyekről (Kárpáti C1, C2E, C2T, C3; Lipari, Mélosz, Szardínia) származó geológiai referenciaminták mérésével megállapítottam, hogy a PGAA-val kiválóan mérhető B és C1 mennyisége ujjlenyomat-szerűen jellemző az egyes lelőhelyekre. A B- és C1-tartalom mérésével a fő nyersanyagforrásokból származó minták – az irodalomban eddig nem ismertett módon – roncsolásmentesen elkülöníthetők. [T2, T5-8]. A bór mérését eddig nem alkalmazták, a klór mérését csak egyetlen tanulmányban említették obszidián leletek eredetének meghatározására. A bór és a klór mellett, a PGAA-val mért Ti mennyisége alapján két ismert méloszi (Adamas és Demenegaki), valamint három eltérő szardíniai (Szardínia A, B, C) obszidiánforrás nyersanyagai egymástól megkülönböztethetők, ami a korábban alkalmazott módszerekkel (XRF, PIXE) nem volt lehetséges, vagy kevésbé volt megbízható [T6].

3. Tézispont. Közel 500 obszidián geológiai és régészeti minta PGAA mérési adatait tartalmazó adatbázist hoztam létre, amely felhasználásával sikeresen azonosítottuk a mai Magyarország, Horvátország, Bosznia-Hercegovina, Lengyelország, Szerbia és Románia területéről származó régészeti leletek nyersanyaglelőhelyeit. Méréseimmel a térségben túlnyomó többségben C1 és C2 típusú kárpáti obszidián előfordulását igazoltam, regionális vagy távolsági nyersanyagként. Megmutattam, hogy Magyarország területén a C1 és C2 típusú nyersanyagból készült régészeti leletek egyaránt megtalálhatók, míg a távolabbi erdélyi, bánáti, havasalföldi (munténiai), ill. lengyelországi régészeti lelőhelyeken szinte kizárólag a jobb minőségű C1 típusú kárpáti obszidián fordul elő [T9-17]. A boszniai-horvát térségben az egyes elterjedési területek természetes határvonala a Dinári-hegység. A dalmát tengerparton kizárólag Lipari eredetű obszidián, a kontinentális részen C1 típusú kárpáti obszidián található. A dalmáciai régészeti obszidiánok szardíniai és méloszi eredete kizárható volt [T16].

II. Téma: Csiszolt kőeszközök vizsgálata

4. Tézispont. Mintegy 1300 csiszolt kőeszköz és nyersanyagminta PGAA-mérésével megmutattam, hogy a fő-, mellék- és nyomelemek alapján a csiszolt kőeszközök fő kőzettípusai: a hornfels, az ultrabázisos kőzetek (nefrit, szerpentin), valamint a bázisos-metabázisos kőzetek (bazalt-kékpala-zöldpala) jól elkülöníthetők egymástól, és a PGAA lehetőséget nyújt a provenienciaanalízisre [T18-19].

A PGAA-mérések az alábbi kárpát-medencei régészeti leleteknél előforduló nyersanyag típusok lelőhelyeinek azonosításához nyújtottak fontos adatokat: A **zöldpala és kontakt metabázis** minták lehetséges nyersanyagforrásoként az Észak-Csehországi Masszívum Krkonoše-Jizera kristályos egységet, Felsőcsatárt, Kis-Kárpátok, valamint a dél-csehországi Želešice térségét azonosítottam. [T19-20]. A Baradla barlang ásatásaiból előkerült **amfibolit** balták nyersanyagának eredete a szlovákiai Gömörikum-Veporikum [T20-21], a **kékpala** kőeszközök nyersanyagának eredete a szlovákiai Mellétei-egységhez köthető [T22]. A **nefrit** kőeszközök többségének a nyersanyaga az alsó-sziléziai Jordanów környékéről, kisebb számban feltételezhetően a Központi (Svájci)-Alpokból származik [T23]. Az ún. „**zöldkő**” (**nagynyomású metaofiolit**) balták PGAA-mérései megerősítik a nyersanyag észak-itáliai (nyugat-alpi) eredetét [T24-26]. A **bazalt** kőeszközök többségének a nyersanyaga TiO_2 -, Fe_2O_3 -, valamint Sm- és Gd-tartalmuk alapján Balaton-felvidéki, ill. nógrádi fiatal (neogén) bazaltnak bizonyult, de idősebb (alsó kréta) mecseki bazaltból készült eszközt is azonosítottunk [T27]. A **hornfels** kőeszközök SiO_2 - és CaO-tartalma alapján régen keresett nyersanyagforrás-területeket sikerült azonosítani Romániában, a Ruszka-havas délnyugati részén, valamint az Erdélyi-középhegység déli részén [T28].

III. Téma: Féldrágakő (lápisz lazuli) nyersanyagok és régészeti tárgyak vizsgálata

5. Tézispont. Mintegy 80 lápisz lazuli nyersanyagmintán végzett PGAA-mérések szerint a mért Cl- és S-tartalom szerint a Chiléből és az Urálból származó nyersanyagok elkülöníthetők egymástól, valamint az afganisztáni és bajkáli nyersanyagoktól [T29-31]. Közel 30 egyiptomi amulett és 10 egyéb régészeti lelet többségénél PGAA-mérésekkel igazoltam az afganisztáni nyersanyag eredetét. Néhány régészeti lelet esetében PGAA-mérésekkel megmutattam, hogy a tárgy nem lápisz lazuliból, hanem hasonló megjelenésű anyagból, pl. „egyiptomi kékből” (azaz kalcium-réz-szilikáttól, $CaCuSi_4O_{10}$), egy-egy esetben egyiptomi fajanszból, ill. feltehetően üvegpasztából készült [T32-33].

IV. Téma: Régészeti üvegleletek vizsgálata

6. Tézispont. Összesen mintegy 600 régészeti üvegminta és nemzetközi referenciaminta mérésével megmutattam, hogy a PGAA-val meghatározható fő-, mellék- és nyomelem-összetevők alapján az irodalomból ismert régészeti üvegtípusok jól azonosíthatók [T34-37]. A mért összetételük alapján a későrómai Histria és Tomis lelőhelyekről származó valamennyi minta az ún. római alapüveg típusba (*homok – mészkő – natúr szóda*) tartozik. Átlagos Na_2O -tartalmuk $17,9 \pm 1,6$ m%, CaO -tartalmuk $7,4 \pm 1,6$ m%, és SiO_2 -tartalmuk $66,8 \pm 2,3$ m% volt. A minták MgO - és K_2O -tartalma 1,5 m% alatti értéknek adódott.

A mért összetétel értékekből irodalmi adatok alapján megállapítottam, hogy a leletek többségének elsődleges nyersanyaga egyiptomi eredetű. Három minta az ún. HIMT (High Iron Manganese Titan) csoportba tartozik, $\sim 2,03$ m% Fe_2O_3 , $\sim 1,97$ m% MnO és $\sim 0,55$ m% TiO_2 -tartalommal. Néhány lelet a levantei eredetű nyersanyagok jellegzetességeit mutatta, amelyek jellemzője a nagy ($\sim 11,2$ m%) CaO -tartalom, $\sim 14,6$ m% Na_2O -, $\sim 0,49$ m% Fe_2O_3 -, $\sim 0,03$ m% MnO - és $\sim 0,09$ m% TiO_2 -tartalom [T38-39]. Néhány szintelen minta anyagában szintelenítőként Mn-t és Sb-t azonosítottam [T40-41], néhány színes üvegletről megállapítottam, hogy színezőanyagként Fe_2O_3 -t, CuO -t és CoO -t tartalmaz [T42]. A középkori és középkor utáni lengyelországi leletek CaO - ill. alkáliatartalmuk alapján a *façon-de-Venice* típus 5 alcsoportjába voltak sorolhatók [T43]. Többségük káliumüveg, bár azonosítható közöttük két nátriumüveg is. A PGAA-módszer bórra vonatkozó nagy érzékenysége lehetőséget kínál az üvegek bóraxtartalmának meghatározására [T34].

A tézisekhez közvetlenül kapcsolódó saját közlemények

- [T1] Kasztovszky, Zs., Maróti, B., Szentmiklósi, L., Gméling, K., Applicability of prompt-gamma activation analysis to determine elemental compositions of silicate-based cultural heritage objects and their raw materials, *Journal of Cultural Heritage* 55 (2022) 356–368.
- [T2] Kasztovszky, Zs., Biró, K. T., Markó, A., Dobosi, V.: Cold neutron prompt gamma activation analysis – a non-destructive method for characterisation of high silica content chipped stone tools and raw materials, *Archaeometry* 50 1 (2008) 12-29.
- [T3] Kasztovszky, Zs., Biró, K. T., Markó, A., Dobosi, V. Prompt gamma activation analysis for non-destructive characterization of chipped stone tools and raw materials, *J. Radioanal. and Nucl. Chem.*, 278 2 (2008) 293–298.
- [T4] Biró, K. T., Kasztovszky, Zs.: Stone artefacts and neutrons - Case studies from Hungary, *Journal of Archaeological Science: Reports* 19 (2018) 669–673
- [T5] Suda, Y., Grebennikov, A. V., Kuzmin, Y. V., Glascock, M. D., Wada, K., Ferguson, J. R., Kim, J. C., Popov, V. K., Rasskazov, S. V., Yasnygina, T. A., Saito, N., Takehara, H., Carter, T., Kasztovszky, Zs., Biró, K. T., Ono, A.: Inter-laboratory validation of the WDXRF, EDXRF, ICP–MS, NAA and PGAA analytical techniques and geochemical characterisation of obsidian sources in northeast Hokkaido Island, Japan, *Journal of Archaeological Science: Reports* 17 (2018) 379-392.
- [T6] Kasztovszky, Zs., Maróti, B., Harsányi, I., Párkányi, D., Szilágyi, V.: A comparative study of PGAA and portable XRF used for non-destructive provenancing archaeological obsidian, *Quaternary International* 468 (2018) 179-189.
- [T7] Kasztovszky, Zs., Lázár, K., Kovács Kis, V., Len, A., Füzi, J., Markó, A., Biró, K. T.: A novel approach in the mineralogy of Carpathian mahogany obsidian using complementary methods, *Quaternary International* 467 (2018) 332-341.
- [T8] Biró, K. T., Markó, A., Kasztovszky, Zs.: 'Red' obsidian in the Hungarian Palaeolithic transition in Central and Eastern Europe, *Praehistoria*, 6 (2005)91-101.
- [T9] Kasztovszky, Zs., Biró, K. T., Kis, Z.: Prompt Gamma Activation Analysis of the Nyírlugos obsidian core depot find, *Journal of Lithic Studies* 1.1, (2014)151-163.
- [T10] Kabaciński, J., Sobkowiak-Tabaka, I., Kasztovszky, Zs., Pietrzak, S., Langer, J.J., Biró K.T., Maróti B.: Transcarpathian influences in the early Neolithic of Poland. A case study of Kowalewko and Rudna Wielka sites *Acta Archaeologica Carpathica* 50 (2015) 5-32.
- [T11] Sobkowiak-Tabaka, I., Kasztovszky, Zs., Kabaciński, J., Biró, K.T., Maróti, B., Gméling, K.: Transcarpathian contacts of the Late Glacial Societies of the Polish Lowlands, *Przegląd Archeologiczny* 63 (2015) 5-28
- [T12] Bernardini, F., Sibilia, E., Kasztovszky, Zs., Boscutti, F., De Min, A., Lenaz D., Turco, G., Micheli, R., Tuniz, C., Montagnari Kokelj, M., Evidence of open-air late prehistoric occupation in the Trieste area (north-eastern Italy): dating, 3D clay plaster characterization and obsidian provenancing, *Archaeological And Anthropological Sciences*, 10 (2018) 1933-1943.
- [T13] Kasztovszky, Zs., Biró, K. T., Nagy-Korodi, I., Sztáncsuj, S. J., Hágó, A., Szilágyi, V., Maróti, B., Constantinescu, B., Berecki, S., Mírea, P.: Provenance study on prehistoric obsidian objects found in Romania (Eastern Carpathian Basin and its neighbouring regions) using Prompt Gamma Activation Analysis, *Quaternary International* 510 (2019) 76–87.
- [T14] Osipowicz, G., Chachlikowski, P., Orłowska, J., Kasztovszky, Zs., Siuda, R., Weckwert, Late Palaeolithic and Mesolithic Treatment and Use of Non-flint Stone Raw Materials: Material Collection P.: From Site 17 at Nowogród, Golub-Dobrzyń District, Poland, *Archaeologia Polona*, 56 (2018) 103-125.

- [T15] Szeliga, M., Kasztovszky, Zs., Osipowicz, G., & Szilágyi, V.: Obsidian in the Early Neolithic of the Upper Vistula basin: origin, processing, distribution and use - a case study from Tominy (southern Poland), *Præhistorische Zeitschrift*, 96(1) (2021) 19–43.
- [T16] Kasztovszky, Zs., Szilágyi, V., Biró, K. T., Težak-Gregl, T., Burić, M., Šošić, R., Szakmány, Gy.: Horvát és bosnyák régészeti lelőhelyekről származó obszidián eszközök eredetvizsgálata PGAA-val, *Archeometriai Műhely* VI/3. (2009) 5-14.
- [T17] Jwa, Y-J; Yi, S; Jin, M-E; Kasztovszky, Zs., Harsányi, I, Sun, G-M.: Application of prompt gamma activation analysis to provenance study of the Korean obsidian artefacts, *Journal of Archaeological Science:Reports* 20 (2018) 374–381.
- [T18] Szakmány, Gy., Kasztovszky, Zs.: Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA), a new method in the archaeological study of polished stone tools and their raw materials, *European Journal of Mineralogy* 16. 2. (2004) 285-295.
- [T19] Szakmány, Gy., Kasztovszky, Zs., Szilágyi, V., Starnini, E., Friedel, O., Biró, K.T.: Discrimination of prehistoric polished stone tools from Hungary with non-destructive chemical Prompt Gamma Activation Analyses (PGAA), *European Journal of Mineralogy* 23 (2011) 883-893.
- [T20] Kereskényi, E., Szakmány, Gy., Fehér, B., Harsányi, I., Szilágyi, V., Kasztovszky, Zs., Tóth, M. T.: Archaeometrical results related to Neolithic amphibolite stone implements from Northeast Hungary, *Journal of Archaeological Science:Reports* 32 (2020) 102437.
- [T21] Kereskényi, E.; Fehér, B.; Kristály, F.; Szilágyi, V.; Kasztovszky, Zs. & Szakmány, Gy.: Provenance of polished stone tools from the Baradla Cave, Aggtelek, North Hungary, *Archeometriai Műhely* XXI. (2023) 1–22.
- [T22] Kereskényi E., Szakmány Gy., Fehér B., Kasztovszky Zs., Kristály F., Rózsa P.: New archaeometrical results related to Neolithic blueschist stone tools from Borsod-Abaúj-Zemplén County, Hungary. *Journal of Archaeological Science:Reports*, 17, (2018) 581-596.
- [T23] Péterdi, B., Szakmány, Gy., Bendő, Zs., Kasztovszky, Zs., Biró, K. T., Gil, G., Harsányi, I., Mile, V., Szilágyi, Sz.: Possible provenances of nephrite artefacts found on Hungarian archaeological sites (preliminary results), *Archeometriai Műhely* XI/4, (2014) 207-222.
- [T24] Bendő, Zs., Szakmány, Gy., Kasztovszky, Zs., Biró, K. T., Oláh, I., Osztas, A., Harsányi, I., Szilágyi, V.: High pressure metaophiolite polished stone implements found in Hungary, *Archaeological And Anthropological Sciences* 11: (2019) 1643-1667.
- [T25] Vácz, B., Szakmány, Gy., Starnini, E., Kasztovszky, Zs., Bendő, Zs.: Nebiacolombo F A; Giustetto R; Compagnoni R, High-pressure meta-ophiolite boulders and cobbles from northern Italy as possible raw-material sources for “greenstone” prehistoric tools: petrography and archaeological assessment, *European Journal of Mineralogy* 31: 5-6 (2019) 905-917.
- [T26] Bernardini, F.; de Min A.; Lenaz, D.; Kasztovszky, Zs.; Lugh, V; Modesti, V; Tuniz, C; Tecchiati, U, Polished stone axes from Varna/Nössingbühel and Castelrotto/Grondlboden, South Tyrol (Italy) *Archaeological and Anthropological Sciences* 11: 4 (2019) 1519-1531.
- [T27] Péterdi, B., Szakmány, Gy, Judik, K., Dobosi, G., Kovács, J., Kasztovszky, Zs., Szilágyi, V.: Bazalt anyagú csiszolt kőeszközök közettani és geokémiai vizsgálata (Balatonöszöd - Temetői dűlő lelőhely), *Archeometriai Műhely* VIII/1. (2011) 33-68.
- [T28] Szakmány, Gy, Józsa, S, Bendő, Zs, Kasztovszky, Zs., Horváth, F: Magyarországon előkerült hornfels (mész-szilikát szaruszirt) anyagú csiszolt kőeszközök nyersanyaglelőhelyének felkutatása, *Archeometriai Műhely* XIII/1. (2016) 43-54.
- [T29] Zöldföldi, J., Kasztovszky, Zs., Mihály, J., Richter, S.: Honnan származik a lápisz lazuli? Roncsolásmentes eredetvizsgálat prompt gamma aktivációs analízis segítségével (in Hungarian), *Archeometriai Műhely*, I/1. (2004) 16-22.

- [T30] Zöldföldi, J., Richter, S., Kasztovszky, Zs., Mihály, J.: Where does Lapis Lazuli come from? *34th International Symposium on Archaeometry, Zaragoza, 2004*, E-book: <http://www.dpz.es/ifc/libros/ebook2621.pdf>, Institución „Fernando el Católico” (C.S.I.C.) Excma. Diputación de Zaragoza, 2006, pp. 353-361.
- [T31] Nöller, R., Feldmann., Kasztovszky, Zs., Szőkefalvi-Nagy, Z., Kovács, I, Characteristic Features of Lapis Lazuli from Different Provenances, Revised by μ XRF, ESEM, PGAA and PIXE, *Journal of Geological Resource and Engineering* 7 (2019) 57-69.
- [T32] Kasztovszky, Zs.: A Budapesti Neutronközpont szerepe az európai kulturális örökség kutatásában – CHARISMA, *Magyar Tudomány* 10 (2011) 1238-1246.
- [T33] Kasztovszky, Zs., Káli, Gy., Zöldföldi, J.: Non-destructive investigations of two Roman gems for the Museum of Fine Arts, Budapest, Research Report, Centre for Energy Research HAS, 2013, pp. 1-9.
- [T34] Kasztovszky, Zs., Kunicki-Goldfinger, J., Dzierżanowski, P., Nawrońska, G., Wawrzyniak, P.: Történelmi üvegek roncsolásmentes vizsgálata prompt gamma aktivációs analízissel és elektron-mikroszondával, *Archeometriai Műhely* II/1. (2005) 48-56.
- [T35] Moropoulou, A., Zacharias, N., Delegou, E.T., Maróti, B., Kasztovszky, Zs.: Analytical and technological examination of glass tesserae from Hagia Sophia, *Microchemical Journal* 125: (2016) 170-184.
- [T36] Zacharias, N.; Kaparou, M.; Oikonomou, A.; Kasztovszky Zs.: Mycenaean glass from the Argolid, Peloponnese, Greece: A technological and provenance study, *Microchemical Journal* 141 (2018) 404-417.
- [T37] Constantinescu, B., Cristea-Stan, D., Szőkefalvi-Nagy, Z., Kovács, I., Harsányi, I., Kasztovszky, Zs.: PIXE and PGAA – Complementary methods for studies on ancient glass artefacts (from Byzantine, late medieval to modern Murano glass), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 417 (2018) 105–109.
- [T38] Bugoi, R., Tarlea, A., Szilágyi, V., Harsányi, I., Cliante, L., Kasztovszky, Zs.: Chemical analyses on late antique glass finds from Histria, Romania, *Archaeometry* 64: (2022) 744–758.
- [T39] Bugoi, R.; Talmaçhi, G.; Szilágyi, V.; Harsányi, I.; Cristea-Stan, D.; Boțan, S.P.; Kasztovszky, Zs.: An archaeometric perspective on selected Roman and Late Antique glass finds from Dobruđa, *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section B* 511 (2022) 84-90.
- [T40] Bugoi, R.; Talmaçhi, G.; Szilágyi, V.; Harsányi, I.; Cristea-Stan, D.; Boțan, S.; Kasztovszky, Zs.: PGAA analyses on Roman glass finds from Tomis, *Romanian Journal of Physics* 66 (2021) 906.
- [T41] Bugoi, R; Târlea, A; Szilágyi, V; Harsányi, I; Cliante, L; Achim, I; Kasztovszky, Zs.: Shedding Light on Roman Glass Consumption on the Western Coast of the Black Sea, *MATERIALS* 15:2 Paper: 403, (2022) 15.
- [T42] Bugoi, R; Tarlea, A; Szilágyi, V; Harsányi, I; Cliante, L; Kasztovszky, Zs.: Colour and beauty at the Black Sea coast: archaeometric analyses of selected small finds from Histria, *Romanian Reports In Physics* 74 (2022) 802.
- [T43] Kasztovszky, Zs., Kunicki-Goldfinger, J.: Újabb eredmények az üvegek archeometriai vizsgálatában prompt gamma aktivációs analízis segítségével, *Archeometriai Műhely* V/3. (2008)51-57.

Egyéb, örökségtudományi témában készült saját közlemények

- [E1] Kasztovszky, Zs., Antczak, M. M., Antczak, A., Millan, B., Bermúdez, J., Sajo-Bohus, L.: Provenance study of Amerindian pottery figurines with prompt gamma activation analysis, *Nukleonika* 49 3 (2004) 107-113.
- [E2] Leghissa, E., Kasztovszky, Zs., Szilágyi, V., Harsányi, I., De Min, A., Princivalle, F., Montagnari-Kokelj, M., Bernardini, F.: Late-Copper-Age decorated bowls from the Trieste Karst (north-eastern Italy): What can typology, technology and non-destructive chemical analyses tell us on local vs. foreign production, exchange systems and human mobility patterns?, *Quaternary International* 539 (2020) 92-104.
- [E3] Sándor Zs., Tölgyesi, S., Gresits, I., Kasztovszky, Zs.: Determination of the alloying elements in ancient silver coins by X-ray fluorescence, *J. Radioanal. and Nucl. Chem.* 254 2 (2002) 283-288.
- [E4] Kasztovszky, Zs., Panczyk, E., Fedorowicz, W., Révay, Zs., Sartowska, B.: Comparative archaeometrical study of Roman silver coins by prompt gamma activation analysis and SEM-EDX, *J. Radioanal. and Nucl. Chem.* 265, No. 2 (2005) 193-199.
- [E5] Mödlinger, M., Piccardo, P., Kasztovszky, Zs., Kovács, I., Szőkefalvi-Nagy, Z., Káli, Gy., Szilágyi, V.: Archaeometallurgical characterization of the earliest European metal helmets, *Materials Characterization* 79 (2013) 22-36.
- [E6] Kiss, V., Fischl, K.P., Horváth, E., Káli, Gy., Kasztovszky, Zs., Kis, Z., Maróti, B., Szabó, G.: Non-destructive analyses of bronze artefacts from Bronze Age Hungary using neutron-based methods, *Journal Of Analytical Atomic Spectrometry* 30:(3) (2015) 685-693.
- [E7] Corsi, J., Maróti, B., Re, A., Kasztovszky, Zs., Szentmiklósi, L., Torbágyi, M., Agostino, A., Angelici, D., Allegretti, S.: Compositional analysis of a historical collection of Cisalpine Gaul's coins kept at the Hungarian National Museum, *Journal Of Analytical Atomic Spectrometry* 30:(3) (2015) 730-737.
- [E8] Šmit, Ž., Maróti, B., Kasztovszky, Zs., Šemrov, A., Kos, P., Analysis of Celtic small silver coins from Slovenia by PIXE and PGAA, *Archaeological and Anthropological Sciences* 12 (2020) 155.
- [E9] Rehren, T., Belgya, T., Jambon, A., Káli, Gy., Kasztovszky, Zs., Kis, Z., Kovács, I., Maróti, B., Martinón-Torres, M., Miniaci, G., Pigott, V. C., Radivojevic, M., Rosta, L., Szentmiklósi, L., Szőkefalvi-Nagy, Z.: 5,000 years old Egyptian iron beads made from hammered meteoritic iron, *Journal of Archaeological Science* 40 (2013) 4785-4792.
- [E10] Watkinson, D., Rimmer, M., Kasztovszky, Zs., Kis, Z., Maróti, B., Szentmiklósi, L.: The use of neutron analysis techniques for detecting the concentration and distribution of chloride ions in archaeological iron, *Archaeometry*, 56, 5 (2014), 841-859.
- [E11] Manescu, A., Fiori, F., Giuliani, A., Kardjilov, N., Kasztovszky, Zs., Rustichelli, F., Straumal, B.: Non-destructive compositional analysis of historic organs reed pipes, *J Phys, Condens Mat* 20 (2008)104250.
- [E12] Di Martino, D., Perelli Cippo, E., Kockelmann, W., Scherillo, A., Minniti, T., Lorenzi, R., Malagodi, M., Merlo, C., Rovetta, T., Fichera, G.V., Albano, M., Kasztovszky, Zs., Harsányi, I., Gorini, G.: A multidisciplinary non-destructive study of ancient pipe organ fragments, *Materials Characterisation*, 148 (2019), 317-322.
- [E13] Di Martino, D., Perelli Cippo, E., Scherillo, A., Kasztovszky, Zs., Harsányi, I., Kovács, I., Szőkefalvi-Nagy, Z., Cattaneo, R., Gorini, G.: An Archaeometallurgical Investigation on Metal Samples from the Chiaravalle Cross, *Heritage* 2, (2019) 836-847.
- [E14] Gyarmati, J., Maróti, B., Kasztovszky, Zs., Dönczö, B., Szikszai, Z., Aradi, L.E., Mihály, J., Koch, G., Szilágyi, V., Hidden behind the mask: An authentication study on the Aztec mask of the Museum of Ethnography, Budapest, Hungary, *Forensic Science International* 333 (2022) 111236.