Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

156/3, 287–301., Budapest, 2026

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2026.156.3.287

Aranytartalmú arzenopirit a börzsönyi Rózsabánya ércesedésében

TURI Judit[1,2], BENKÓ Zsolt[3,4], TÖRÖK Kálmán[1], VIRÁG Attila[5]

[1]SZTFH Földtani és Laboratóriumi Osztály, 1123 Budapest, Alkotás utca 50.
[2]ELTE TTK, Ásványtani Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C
[3]HUN-REN Atommagkutató Intézet, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c
[4]DE TTK, Ásvány- és Földtani Tanszék, 4032 Debrecen, Egyetem tér 1.
[5]ELTE TTK, Kőzettan-Geokémiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

Gold-bearing arsenopyrite from the mineralization of Rózsabánya, Börzsöny Mts, N Hungary

Abstract

The Au(-Pb-Zn-Ag-Cu) mineralization of Rózsabánya in the Börzsöny Mts contains critical elements, such as As, Bi, Co and Sb. The main As-bearing mineral of the deposit is arsenopyrite, that appears in two different forms. The earlier crystallized arsenopyrite (arsenopyrite-I) is characterized by large (from ~100 μm–2 mm) euhedral-subhedral crystals, porous texture and native gold in its pores, while arsenopyrite-II forms smaller (10–50 μm) euhedral crystals, without observable native gold inclusions. Bismuth occurs as native bismuth, bismuthinite, and bismuth-sulfosalts, and Co mostly appears as trace elements in other sulfides (e.g., arsenopyrite, pyrrhotite, pyrite). In this study we investigated the trace element content of 53 ore-concentrates using inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) and inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS) to obtain quantitative information about the trace element content of the mineralization, as well as the composition of arsenopyrite using electron probe micro-analysis (EPMA), to get a more accurate understanding of the element migration during the ore-forming processes.

Based on the positive correlation of Au, Bi, and Co with As in the ore-concentrates, a strong genetic relationship can be suggested between these elements and the arsenopyrite. According to our results, both arsenopyrite generations contain trace elements, such as Co, Ni, Sb and Au, but the later crystallized arsenopyrite-II is more enriched in these elements. This observation supports the partial remobilization of previously precipitated minerals (e.g., arsenopyrite-I, pyrrhotite). Based on the correlations of the major and trace elements in arsenopyrite, Co and Ni can substitute Fe in the structure of arsenopyrite, while Au might occur mainly as nanoinclusions, although its chemically-bound presence cannot be completely excluded.

Keywords: arsenopyrite, trace elements, ICP-MS, ICP-OES, EPMA

Összefoglalás

A börzsönyi Rózsabánya Au(-Pb-Zn-Ag-Cu) ércesedése arzént, antimont, bizmutot és kobaltot, azaz az EU országaiban kritikus elemnek számító elemeket tartalmaz. Az arzéntartalmú arzenopiritnek két típusa különíthető el. Az első generációs arzenopirit (arzenopirit-I) nagyobb kristályméretű (~100 μm–2 mm), porózus szövetű, valamint gyakran figyelhető meg pórusaiban termésarany. A második generáció (arzenopirit-II) kisebb méretű (10–50 μm), sajátalakú kristályokból áll, és termésarany zárvány nem figyelhető meg benne. A Bi termésbizmutként, Bi-szulfidként, illetve Bi-szulfosókként fordul elő Rózsabánya ércesedésében, míg a Co leginkább más ásványok nyomelemeként (pl. arzenopirit, pirrhotin, pirit). Munkánk során 53 érckoncentrátum fő- és nyomelemvizsgálatát végeztük el induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometriai (ICP-OES), illetve induktív csatolású plazma tömegspektrometriai (ICP-MS) módszerekkel, hogy megismerjük az ércesedésben előforduló nyomelemek mennyiségét. Emellett vizsgáltuk a rózsabányai arzenopirit két generációjának nyomelem-összetételét azzal a céllal, hogy pontosabb képet kapjunk az ércképződés során bekövetkezett elemmigrációról.

Eredményeink szerint az arany, a bizmut és a kobalt mennyisége az arzén mennyiségével pozitívan korrelál, ami az arzenopirittel való szoros genetikai kapcsolatukat igazolja. Méréseink során mindkét arzenopirit generációban mérhető volt Co, Ni, Sb és Au, de a második generációs arzenopirit mind a négy elem esetében gazdagabbnak bizonyult a korábbi keletkezésű arzenopiritnél, ami alátámasztja az ércparagenezis korábbi ásványainak (arzenopirit-I, pirrhotin) részleges remobilizációját. A vizsgált arzenopirit generációk fő- és nyomelemeinek összefüggései alapján a kobalt és a nikkel a vas helyére épülhet be az arzenopirit szerkezetébe, míg az arany valószínűleg főként nanozárványok formájában fordul elő, bár szerkezetben kötött jelenléte sem zárható ki teljesen.

Tárgyszavak: arzenopirit, nyomelemek, ICP-MS, ICP-OES, EPMA

Bevezetés

Az arzenopirit az egyik leggyakrabban előforduló As-tartalmú ércásvány, amely számos, magas hőmérsékleten (250–500 °C) képződött hidrotermás érctelep típusban előfordul (POKROVSKI et al. 2002). Megtalálható többek között porfíros Sn-W és Cu(±Au) ércesedésekben, polimetallikus Cu-Pb-Zn-Ag ércesedésekben, valamint orogén arany ércesedésekben is (GENKIN et al. 1998, POKROVSKI et al. 2002, SCOTT 1983).

Az arzenopirit az Au egyik leggyakoribb befogadó ásványa. Előfordulhat benne természetaranyzárványként (a látható mérettartománytól a nanozárványokig), illetve az ásvány szerkezetébe épülve (POKROVSKI et al. 2021). Bár az arzenopirit arannyal való kapcsolatának termodinamikai és geokémiai jellemzése régóta kutatott terület, az együttes előfordulásukat eredményező mechanizmusok máig kérdésesek (POKROVSKI et al. 2002, 2021; SCOTT 1983). Bár számos, szerkezetben kötött aranyat tartalmazó ásványt (löllingit, arzenopirit, pirit) vizsgáló kutató egyetért abban, hogy az arany vasat helyettesíthet a szerkezetben, az arany és az arzén kapcsolatára nem született egységes magyarázat (FLEET & MUMIN 1997, GENKIN et al. 1998, MANN 2017, POKROVSKI et al. 2002). POKROVSKI et al. (2021) röntgen-abszorpciós spektroszkópiai vizsgálataik (röntgen-abszorpciós él spektroszkópia – XANES és kiterjesztett röntgen-abszorpciós finomszerkezet spektroszkópia – EXAFS) alapján megállapították, hogy az arany az arzént tartalmazó ásványok (arzenopirit, löllingit, As-tartalmú pirit) és az arzénmentes ásványok (As-szegény pirit) szerkezetébe különböző módon épül be. Modelljükben ezt a folyamatot az arany és az arzén közötti redoxreakciók koordinálják, vagyis a beépülés mechanizmusa nem egyszerű Fe-helyettesítés, hanem függ az ércképző rendszer As-tartalmától és redoxviszonyaitól. Eredményeik szerint az arany az arzenopiritben az oktaéderes Fe-pozíciójába Au (II) oxidációs állapotban épül be (POKROVSKI et al. 2021).

A Börzsöny hegységi aranyelőfordulás a középkor óta ismert, a felszíni régió arany- és ezüstkészletét a 13. és a 18. sz. között – kisebb megszakításokkal – folyamatosan bányászták (NAGY 1984). Természetarany a felszínközeli ércesedésben leginkább arzenopirithez, valamint termésbizmuthoz és más bizmutásványhoz kapcsolódik. PANTÓ et al. (1960) úgy gondolták, hogy az arzenopirit az ércesedés késői szakaszában keletkezett, ezáltal a természetarany, a termésbizmut és a bizmutin is egy alacsony hőmérsékletű, késői fluidumból vált ki. Az említett szerzők által felállított modell szerint az ércesedés kezdeti szakaszában nagy mennyiségben kristályosodó pirrhotin Fe-leadással piritté, majd markazittá alakult, az így keletkező Fe-szulfidokból pedig As-felvétellel arzenopirit keletkezett. Bár szöveti és morfológiai tulajdonságaik alapján kétféle arzenopiritet különítettek el (szivacsos-gödrös, ill. sajátalakú-hintett), ezek képződését egyidejűnek gondolták. DÓDONY (1990) a börzsönyi szulfidok reális szerkezeti vizsgálata során szintén két arzenopirit típust különített el. Vizsgálatai szerint a nagyobb kristályméretű (1–2 mm) arzenopirit magas keletkezési hőmérséklettel jellemezhető, valamint a pirrhotin képződését megelőzően keletkezett. A kisebb (~1–50 μm), sajátalakú kristályokból álló generáció képződése alacsonyabb hőmérsékleten ment végbe a pirrhotin kristályosodása után. A rózsabányai előfordulás ércásvány-paragenezisének újravizsgálata során TURI et al. (elbírálás alatt) szintén egy pirrhotin előtti és egy pirrhotin utáni arzenopirit generációt különítettek el. Az arzenopirit első, „szivacsos" szövetű generációjához kapcsolódóan természetarany és termésbizmut±bizmut-szulfid/-szulfosó együttes előfordulását figyelték meg, míg a későbbi arzenopirit generáció kristályaiban természetarany nem volt azonosítható az optikai és elektronmikroszkópos módszerek észlelési mérettartományában. Az említett szerzők által felállított háromszakaszos ércesedési modell szerint az ércképződés második szakaszában egy magas hőmérsékletű (>400 °C), reduktív fluidum részben remobilizálta a korábbi ásványok egyes elemeit, köztük az arzenopirit és az arany egy részét is.

Munkánk során vizsgáltuk a két arzenopirit generáció, valamint a központi terület mintáiból származó érckoncentrátumok fő- és nyomelemösszetételét, hogy pontosabb képet kapjunk az ércek nyomelemtartalmáról és a remobilizáló folyamat során bekövetkezett elemmigrációról.

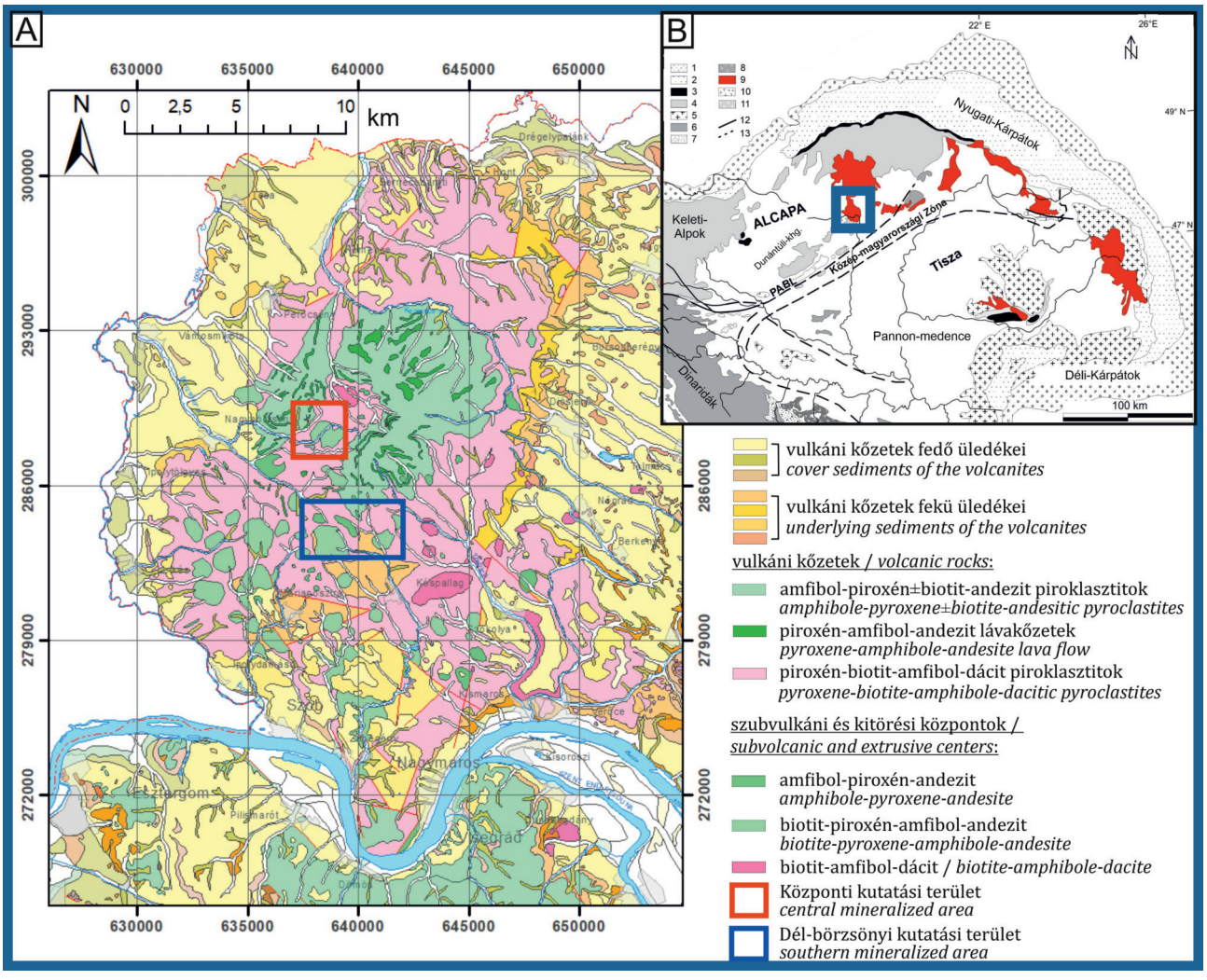
Földtani háttér

A Börzsöny vulkanizmusa

A Börzsöny a Kárpát–Pannon régió neogén–kvarter vulkáni képződményeinek egyik legnyugatibb és legidősebb tagja (*1. ábra*; KARÁTSON et al. 2000; HARANGI et al. 2006, 2024). A neogén–kvarter vulkanizmus motorja a régióban a földkéreg extenzióhoz kapcsolódó elvékonyodása volt, amely következtében 4 típusú vulkáni működés zajlott: (1) szilíciumgazdag (17,5–14,4 millió éve), (2) mészalkáli (a Pannon-medence északi részén 16,6–10 millió éve), (3) káli-ultrakáli (17–15 millió éve) és (4) alkáli bazalt vulkanizmus (12–0,6 millió éve (HARANGI et al. 2006, 2024; LUKÁCS et al. 2018). A Börzsöny vulkáni kőzetei a (2) mészalkáli vulkáni működés termékei. Az első kitörések sekélytengeri környezetben történtek 16,5–16,0 millió évvel ezelőtt (KARÁTSON et al. 2000). Ebben a szakaszban keletkeztek a gránáttartalmú, dácitos összetételű vulkanoklasztitok, illetve lávadómok, majd a medence feltöltődése után az andezites-dácitos összetételű vulkáni törmelékek. A vulkáni működés második szakaszában, 16,0–14,5 millió évvel ezelőtt andezites összetételű lávakőzetek keletkeztek (KARÁTSON et al. 2000). A harmadik szakaszban (14,5–13,7 millió év) a vulkáni működés egyre bázisosabbá vált, mely során andezites-bazaltos összetételű kőzetek keletkeztek (HARANGI et al. 2001, KARÁTSON et al. 2000).

A Börzsöny ércesedése

Az ércesedést befogadó, hidrotermásan átalakult magmás kőzetek és a nem érces, üde fedő vulkanitok K/Ar koradatai alapján (15,2–14,8 millió év) a börzsönyi ércesedése-



1. ábra. A Börzsöny földtani felépítése és helyzete a Kárpát-Pannon térségben. A) A Börzsöny földtani térképe (SZTFH digitális adatbázisának felhasználásával). Kék négyszöggel a „Dél-börzsönyi", piros négyszöggel a „Központi kutatási területet" jelöltük. B) A Kárpát-Pannon térség fedetlen neogén-kvarter vulkáni képződményei (piros; CSONTOS & VÖRÖS 2004 és BENKÓ et al. 2012 alapján). A Börzsöny hegységet az 1B ábrán a kék keret mutatja. 1B ábra jelmagyarázata: 1. Alp-Kárpáti előtér, 2. Alp-Kárpáti flis öv, 3. Pennini ofiolitok, 4. Alcapa főegység, 5. Tisza-Dacia főegység, 6. Dél-Alpi, Dinári, Adriai egység, 7. Boszniai flis, 8. Vardar-óceánból származó mezozoos ofiolit és melanzs, 9. Középső miocén – szubrecens vulkanitok, 10. Paleogén hipabisszikus, szubvulkáni és vulkáni kőzetek a Periadriai-Balaton Lineamens (PABL) mentén, 11. Karbon-triász gránitintrúziók a PABL mentén, 12. Fő törésvonalak (fedetlen), 13. Fő törésvonalak (fedett)

Figure 1. *Geological map of the Börzsöny Mountains and its position in the Carpathian-Pannonian region. The „Central mineralized area" is marked by the red-, while „the southern mineralized area" is marked by the blue rectangle. A) Geological map of the Börzsöny Mountains (using the digital database of the SARA). B) Exposed Neogene-Quarter volcanic formations of the Carpathian-Pannonian region (red). In figure 1B, the Börzsöny Mountains are marked by the blue rectangle. Legend: 1. Alpine-Carpathian foredeep, 2. Alpine-Carpathian flysch belt, 3. Penninic ophiolites, 4. Alcapa unit, 5. Tisza-Dacia units, 6. Southern Alpine, Dinaridic, Adriatic units, 7. Bosnian flysch, 8. Mesozoic ophiolite and melange derived from the Vardar ocean, 9. Middle Miocene – subrecent volcanic rocks, 10. Paleogene hypabyssal, subvolcanic, and volcanic rocks along the Periadriatic-Balaton Lineament (PABL), 11. Carboniferous to Triassic granitic intrusions along the PABL, 12. Exposed main fault lines, 13. Subcrop main fault lines*

ket a miocén vulkáni működés második, andezites szakaszához (kora badeni) kötik (KORPÁS & LANG 1993), amely során erőteljes szubvulkáni és intruzív tevékenység zajlott a területen. Magát az ércesedést a vulkanizmus első fázisában keletkezett piroklasztitokkal váltakozó vulkáni-üledékes sorozatok, illetve a második fázisban képződött andezites összetételű szubvulkáni és lávakőzetek tartalmazzák (CSILLAGNÉ TEPLÁNSZKY et al. 1983, KORPÁS et al. 1998). Korábbi érckutatások a hegységben két fő területre fókuszáltak: (1) A központi kutatási területre, Nagybörzsöny településtől keletre, amely megközelítőleg a Kuruc-bérc és Zálog-bérc közötti területet foglalja magában (CSILLAGNÉ TEPLÁNSZKY et al. 1983), illetve (2) a dél-börzsönyi kutatási területre, amely pedig főként Nagyirtáspuszta és Szokolya környékén ismert indikációkat (*1. ábra*; NAGY 1990) jelenti.

A kutatások során feltárt ércesedési típusokat egy folyamatosan hűlő porfíros rézércesedési rendszer különböző szintű elemeiként határozták meg (CSILLAGNÉ TEPLÁNSZKY et al. 1983, PENTELÉNYI & VETŐNÉ ÁKOS 1996, KORPÁS et al. 1998). Ebben a rendszerben a Rózsabánya környéki, felszínközeli nemesfém-ércesedést alacsony szulfidációs fokú, epitermás telepként (LS) írták le, 160 °C-nál alacsonyabb képződési hőmérséklettel. Ezzel szemben a területről alkotott legújabb modell (TURI et al., elbírálás alatt) alapján a Bör-

zsöny ércesedése egy reduktív savanyú intrúzióhoz kapcsolódó, ún. redukált porfíros-réz ércesedés, amely kialakulását több hőmérséklet-emelkedéssel és a redoxviszonyok változásával járó folyamat befolyásolta. Ebben a modellben a Központi kutatási terület nemesfém tartalmú ércesedése nem egy alacsony szulfidációs fokú epitermás telep, hanem magas képződési hőmérsékletű (450–250 °C), intrúzióhoz közelebbi kifejlődés.

Anyag és vizsgálati módszerek

Ötvenkettő darab, az egykori kutatótárókból származó mintát válogattunk ki a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH) Földtani Gyűjteményéből. A további vizsgálatokhoz 29 mintából készült felületi csiszolat, 24 mintából pedig vékonycsiszolat az SZTFH Laboratóriumában.

A két arzenopirit generáció *in situ* mérésére két mintát választottunk ki előzetes petrográfiai vizsgálatok alapján, Nikon D5100 digitális kamerával felszerelt Nikon ECLIPSE Ci POL polarizációs mikroszkóppal. Az arzenopirit elemösszetételének meghatározása JEOL JXA-8200 WD/ED elektron-mikroszondával (EPMA) történt a Leobeni Egyetem (Montanuniversität Leoben) Eugen F. STUMPFL laboratóriumában. Az egyes mérési pontokban As, S, Fe, Co, Sb, Ni, Au elemek mérésére került sor 20 kV gyorsítófeszültséggel és 10 nA mintaárammal, SPI Supplies természetes és mesterséges arzenopirit (Arsenopyrite20), skutterudit (Skutter 20 P2), antimonit (StibniteLb20), pentlandit (PentlanP2 20KV) és $AuAgTe_2$ ($AuAgTe_2$ 20KV) referenciaanyagok felhasználásával. Az egyes mérési pontokban jellemző kimutatási határokat, illetve az egyes elemek mennyiségi meghatározásához figyelembe vett spektrumvonalakat az *I. táblázat* foglalja össze.

Az ércek fő- és nyomelem-összetételének meghatározására az 52 db-os mintából makroszkóposan szeparáltunk 20-25 g mennyiségű szulfidos anyagot, amely szeparátumok teljes egészében 63 μm alatti szemcseméretre lettek porítva. A porított minták feltárása királyvízzel történt az SZTFH Laboratóriumában. Ezt követően az elkészített oldatok elemzése Jobin Yvon Ultima 2C ICP-OES és PerkinElmer NexION 1000 ICP-MS műszerekkel történt, amely során a következő elemek mérésére került sor: Co, Cr, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Se, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ta, W, Tl, V, Pb, Zn, Bi, Th, U, Ru, Pd, Sn, Sb, Te, Hf, Pt, Ir, Au.

Az érckoncentrátumok összetétel-eredményeinek főkomponens-elemzése R szoftverkörnyezetben készült (4.5.0 verzió; R CORE TEAM 2025).

I. táblázat. A vizsgált elemek (adott vonalon érvényes) átlag kimutatási határai (t%)

Table I. *Average detection limits of the analyzed elements (by the given analysis lines) (wt.%)*

As (L)	S (K)	Fe (K)	Co (K)	Sb (L)	Ni (K)	Au (L)
0,030	0,011	0,014	0,011	0,019	0,013	0,054

Eredmények

Az érckoncentrátumok nyomelemvizsgálati eredményei

Az egykori kutatótárókból származó érckoncentrátumok fő- és nyomelem-összetételét a *II. táblázat* foglalja össze. Az ércekben a Zn (0,005–41 t%, medián: 0,56 t%, n=52), az Pb (0,003–20 t%, medián: 0,38 t%, n=52) és az As (0,001–32 t%, medián: 0,1 t%, n=52) dominál, illetve kiemelendő még a Cu (0,003-6,5 t%, medián: 0,1 t%, n=52) mennyisége. Több mintánál figyelemre méltó Ag (max. 0,08 t%, medián: 0,004 t%, n=52), Bi (max. 0,7 t%, medián: 0,007 t%, n=52), Co (max. 0,8 t%, medián: 0,006 t%, n=52), Cd (max. 0,2 t%, medián: 0,003 t%, n=52), Se (max. 0,06 t%, medián: 0,002 t%, n=52), Sn (0,09 t%, medián: 0,003 t%, n=52) és Sb (max. 0,2 t%, medián: 0,006 t%, n=52) koncentráció mérhető.

Arzenopirit-I és arzenopirit-II elektron-mikroszondás vizsgálata

A mérések során két kiválasztott mintában vizsgáltuk az arzenopirit generációk összetételét. A 4798 sz. minta arzenopirit-kristályai az első generációt képviselik (arzenopirit-I; *2. ábra*). Méretük eléri a mm-es mérettartományt. Szövetük porózus, összetételük inhomogén (*3. ábra*). A pórusokban termésbizmut, termésarany és bizmutin található közvetlenül egymás mellett és külön-külön is. Az arzenopiritet pirrhotin, pirit, galenit, szfalerit, kalkopirit, termésbizmut és bizmut-szulfidok/szulfosók szorítják ki *(2. ábra*). Az arzenopirit-I *3. ábrán* jelölt pontjaiban mért összetételét a *III. táblázat* tartalmazza (21–32 mérési pont).

A 4828 sz. minta arzenopiritje a második, pirrhotin utáni generációhoz tartozik (arzenopirit-II; *2. ábra*). Szövete hintett, kis méretű (1–50 μm) kristályai sajátalakúak. Kalkopiritet, szfaleritet és piritet szorít ki (*2. ábra*). Kémiai összetétele inhomogén, változékonysága leginkább az As és a S arányának, valamint a Fe és a Co (±Ni) arányának változásában nyilvánul meg. Zárványként csak bizmutásványok láthatók benne, de rendkívül kis méretük (~1–3 μm) miatt ezek meghatározása nem volt lehetséges. Az arzenopirit-II *3. A-C ábrán* jelölt pontjainak t%-os összetételét a *III. táblázat* tartalmazza (1–20 mérési pont).

Diszkusszió

Az érckoncentrátumok nyomelem-összetétele, az eredmények statisztikai értékelése

Az ércmikroszkópos vizsgálatok alapján az érckoncentrátumok jelentős részét adó Zn szfalerithez, az Pb galenithez, az As pedig arzenopirithez kapcsolódik. A nyomelemzések eredményein végzett főkomponens-analízis (PCA) során két egymással hasonlóan viselkedő elemcsoport különíthető el: az egyik a Zn-Cd-Pb-Sn-Ag-Sb-Tl-Ge, a másik a

II. táblázat. A központi területről származó érckoncentrátumok nyomelem-összetétele [mg/kg]

Table II. *Trace element content of the ore concentrates from the central Börzsöny [mg/kg]*

Mintaszám Sample ID	Co	Cr*	Ni*	Cu	Ga	Ge	As*	Se	Rb	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	W	Tl	V*	Pb	Zn*	Bi	Sn	Sb	Te	Au
4806	120	< 5	8,52	633	6,07	0,84	40552	1,00	34,6	11,1	1,90	0,22	0,87	57,3	983	1,33	7,46	40,1	30300	183689	0,98	83,8	478	0,07	5,67
4798	937	< 5	7,39	3480	1,55	0,74	78273	209	7,75	1,39	0,72	0,27	0,55	107	42,1	48,6	1,13	11,8	5350	6424	4270	12,2	156	4,28	3,99
4799	46,3	< 5	< 5	836	6,50	0,96	1644	6,94	40,5	2,46	1,47	0,13	0,75	188	624	1,81	0,44	32,6	98500	115596	226	57,1	91,9	6,30	0,00
4817	13,1	< 5	< 5	274	3,02	7,20	148	0,00	12,0	0,99	0,98	0,10	0,20	712	603	0,88	4,36	57,7	202000	121649	1,23	526	1731	0,04	0,00
4823	158	< 5	< 5	1439	8,30	0,85	2164	9,82	45,5	3,15	1,63	0,15	0,60	36,5	447	6,51	1,07	32,8	6340	82999	84,4	39,0	248	0,23	0,36
4828	127	6,48	13,0	64866	5,92	0,64	635	38,7	51,4	3,27	2,06	0,21	3,23	135	37,0	8,62	0,78	21,0	1990	6562	41,5	190	15,4	0,54	1,82
11202	1040	6,09	25,1	1265	3,20	0,72	46731	86,5	25,9	3,62	3,19	0,21	1,94	11,3	1,25	1,35	0,37	21,0	762	238	162	20,2	122	6,40	0,87
11203	94,3	< 5	< 5	1227	6,55	3,24	1259	17,3	18,3	8,22	0,43	0,05	0,20	128	2209	0,37	1,50	17,6	43500	408857	3,56	442	148	0,05	0,10
11208	44,5	< 5	< 5	1020	5,69	1,26	712	14,5	14,0	11,8	0,52	0,07	2,71	325	1264	1,57	1,81	27,9	160000	225516	10,5	834	328	0,24	0,03
11285	2810	< 5	121	339	5,47	0,61	126240	200	30,4	6,83	0,46	0,29	1,48	47,7	59,1	6,42	0,93	12,1	5660	8704	630	38,9	548	0,29	4,87
4748	7690	n.d.	119	1208	1,05	1,16	320313	610	3,87	0,35	0,26	0,52	1,07	12,1	17,7	5,89	0,10	< 5	365	2660	6685	5,71	379	18,4	36,4
4749	1370	8,71	14,3	2076	9,30	0,58	65186	147	54,6	14,4	1,15	0,24	3,11	44,8	12,3	173	1,00	44,8	3580	1952	607	40,5	111	1,51	5,98
4766	56,1	n.d.	< 5	6223	0,16	1,33	705	50,7	0,28	0,08	0,34	0,10	0,19	54,6	4,75	18,2	0,42	n.d.	3210	743	432	18,5	52,7	4,39	2,53
4771	2160	6,56	< 5	3956	14,4	0,93	40449	81,7	85,4	2,62	1,07	0,20	11,8	27,4	2,61	10,2	1,41	66,5	1140	402	2333	56,4	130	8,99	25,6
4773	50,5	< 5	n.d.	442	0,37	1,14	337	18,2	0,83	0,18	0,17	0,09	0,20	57,7	14,5	2,91	3,76	< 5	18090	2304	139	2,43	346	0,57	0,12
4810	123	< 5	< 5	902	3,69	0,54	2357	32,0	14,7	7,70	3,43	0,21	0,74	118	11,1	18,7	1,84	18,8	9550	1755	459	25,2	35,5	1,13	0,45
4840	59,7	< 5	< 5	979	3,55	0,54	139	29,0	1,16	0,84	0,32	0,07	0,26	117	858	3,67	0,34	< 5	51090	170331	224	18,6	22,0	1,43	0,00
11210	494	< 5	7,23	958	0,80	0,97	87036	159	1,85	0,75	1,23	0,27	0,28	31,0	26,3	6,97	0,58	6,03	3770	4477	663	2,05	34,1	3,56	1,95
4754	82,7	< 5	5,09	1624	7,22	0,95	84,9	43,1	87,7	8,48	2,29	0,14	1,53	10,7	1,43	1,12	1,15	49,9	991	288	30,4	18,2	6,01	0,50	0,02
4767	62,3	n.d.	< 5	1489	0,07	1,03	14370	34,5	0,69	0,63	0,23	0,11	0,38	8,74	2,50	6,38	1,48	< 5	628	422	27,5	2,81	17,8	0,11	0,04
4772	32,4	n.d.	< 5	2540	0,70	0,41	125	68,8	3,03	0,82	1,54	0,30	0,13	160	93,8	6,94	0,59	6,4	11900	15697	837	10,5	16,3	0,26	0,68
4775	64,1	< 5	< 5	8326	0,21	0,80	5659	99,2	0,95	0,72	0,24	0,11	0,14	28,8	2,01	13,5	0,14	< 5	1280	407	206	25,3	13,6	0,30	0,17
4778	77,3	< 5	5,68	3850	0,38	0,71	55759	34,4	2,06	0,35	0,27	0,18	0,13	27,4	3,85	2,58	0,30	5,4	2190	675	155	12,2	52,3	0,12	0,27
4781/2	59,9	< 5	5,30	2935	0,31	0,84	42083	28,9	1,80	0,11	0,34	0,16	0,20	33,7	1,12	2,29	0,22	< 5	2150	200	270	6,37	43,9	0,13	0,24
4788/9	1300	5,90	< 5	1204	5,66	1,33	32570	31,0	46,0	4,46	2,53	0,25	0,85	138	89,2	21,9	6,04	15,1	18300	13079	495	23,0	98,1	1,04	1,47
11212	30,0	5,50	5,50	1051	6,81	0,26	118	1,91	33,6	3,18	0,52	0,11	0,48	65,0	1856	0,37	0,41	26,3	20100	347727	5,84	896	62,8	0,08	0,18
4809	103	23,3	7,27	410	10,3	0,61	4520	5,28	82,8	4,61	1,34	0,11	1,01	119	161	0,64	1,23	129	63500	29750	15,0	41,1	137	1,79	0,24

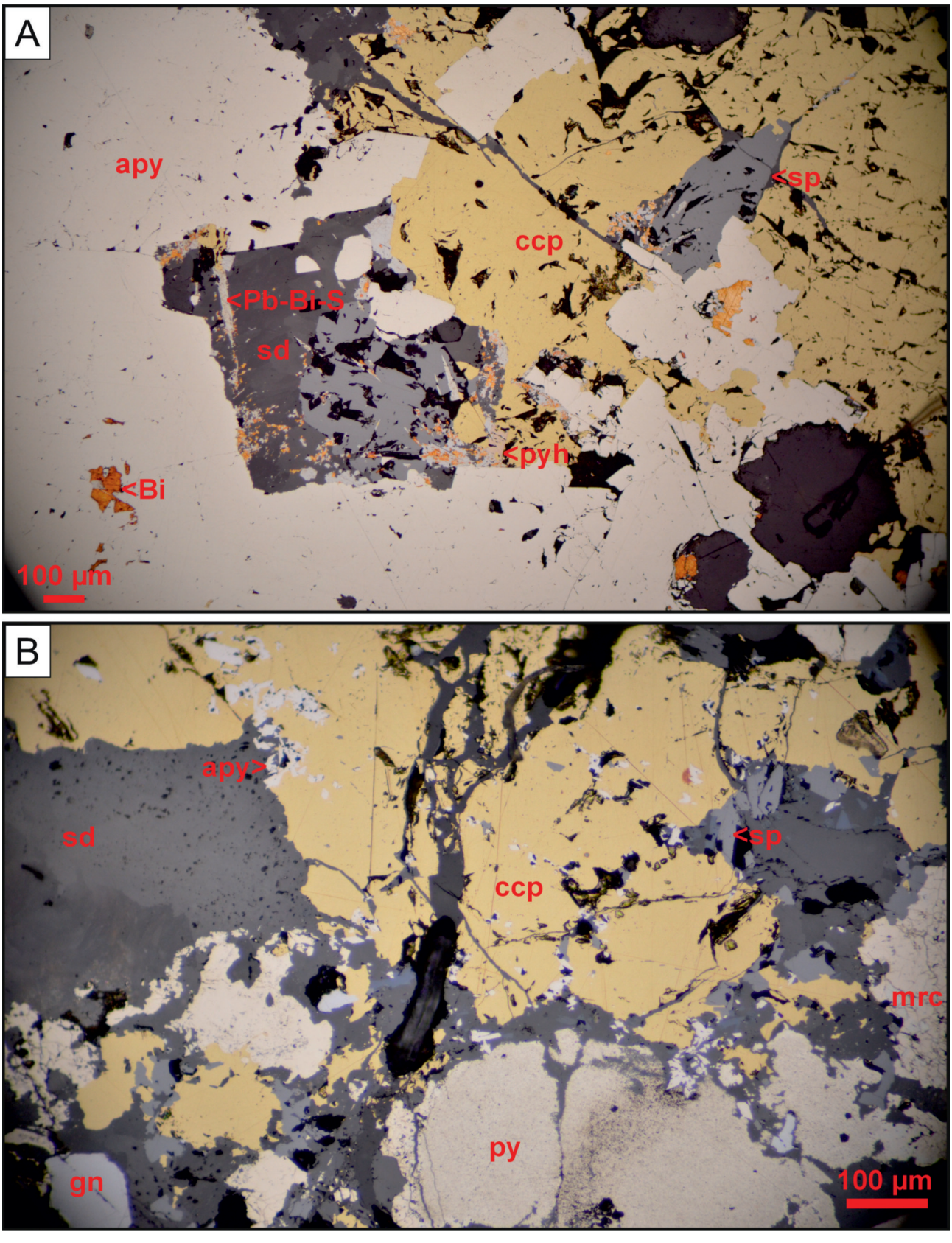
II. táblázat folytatása
Table II. continued

Mintaszám Sample ID	Co	Cr*	Ni*	Cu	Ga	Ge	As*	Se	Rb	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	W	Tl	V*	Pb	Zn*	Bi	Sn	Sb	Te	Au
4821	78,9	6,25	< 5	76,4	8,04	0,23	177	1,13	39,7	14,9	7,33	0,20	1,68	1,93	142	0,54	0,87	59,4	513	29025	2,90	10,7	6,16	0,18	0,92
4824	48,3	n.d.	n.d.	479	1,93	1,00	1485	24,5	10,8	16,9	0,84	0,35	0,23	9,01	92,8	7,97	1,34	13,8	3752	17148	7,41	22,2	15,8	0,18	0,19
11211	54,2	< 5	5,65	154	9,78	2,43	167	1,94	48,2	4,74	5,96	0,18	0,77	509	340	1,60	3,54	38,2	204000	60819	0,84	258	424	0,00	0,04
11214	1770	7,23	33,5	1012	8,64	0,83	78545	100	49,4	8,23	3,12	0,41	4,26	37,1	3,12	8,26	1,31	40,2	3840	590	564	27,8	152	0,14	2,37
11281	13,6	9,53	< 5	4480	10,7	0,90	1753	7,03	63,7	10,2	3,43	0,31	1,61	82,7	250	3,27	4,51	36,9	42400	52387	55,0	88,4	64,3	0,00	0,33
11312	20,4	18,2	5,31	320	10,5	0,78	35,8	1,03	48,4	12,9	1,97	0,26	1,95	1,72	1,44	0,40	0,67	101	242	316	1,95	20,6	1,49	0,01	0,11
11282	64,3	11,8	6,09	320	14,5	0,63	33,4	8,18	37,7	15,3	1,19	0,26	1,41	4,68	40,4	1,16	0,71	139	3280	7730	8,00	25,3	8,27	0,00	0,01
11290	24,1	14,7	7,88	229	13,3	0,40	56,7	5,08	114,0	9,61	2,00	0,20	4,22	5,80	4,05	1,09	1,46	54,0	1790	843	12,3	47,9	1,96	0,00	0,01
11296	4,40	< 5	n.d.	75,5	1,54	0,00	245	0,23	10,4	12,0	0,36	0,19	7,77	0,28	0,15	0,54	0,11	6,55	28,0	49,6	3,94	3,54	9,62	0,01	0,04
4874	99,0	n.d.	7,52	48726	0,74	1,07	25244	72,3	0,82	0,85	0,20	0,42	0,16	97,0	10,1	24,3	1,03	n.d.	1110	2046	566	275	52,9	0,43	1,09
11307	18,9	14,9	5,92	155	11,5	0,36	< 20	1,93	80,1	13,7	3,93	0,39	2,13	2,05	23,2	1,98	1,05	56,7	648	4788	3,54	18,8	1,29	0,00	0,00
11294	505	< 5	7,53	6420	1,87	0,64	44202	50,9	10,2	4,49	0,30	0,36	1,13	88,5	13,0	1,97	0,79	7,36	3180	2738	1322	36,3	242	0,70	13,7
4787/8	439	< 5	< 5	891	2,32	0,81	11014	30,8	17,1	4,19	1,09	0,32	4,95	127	65,7	11,7	0,39	15,2	29600	13854	127	19,5	47,2	6,24	1,00
4752	13,3	7,79	< 5	1611	9,68	0,27	50,6	3,43	47,3	3,66	3,45	0,24	1,03	47,1	356	1,97	0,52	30,5	20700	71434	8,39	44,9	45,0	0,00	0,36
4753	89,5	n.d.	12,5	679	0,60	1,96	512	39,0	0,87	2,04	1,17	0,31	0,71	18,9	22,1	7,85	0,85	< 5	3770	4651	48,8	116	82,2	0,41	0,25
4751	18,5	8,54	< 5	1864	7,36	0,40	126	14,1	36,7	2,22	8,49	0,28	0,74	37,7	910	1,98	0,58	23,5	17000	154894	23,0	61,5	27,8	0,01	0,24
4780/1	43,4	10,1	< 5	173	13,9	0,45	3083	15,3	80,4	5,08	6,80	0,27	1,04	2,66	3,86	1,49	1,23	55,4	217	698	51,7	54,2	7,47	0,03	0,13
4838	39,3	n.d.	< 5	1615	10,7	0,61	< 20	4,46	1,10	0,23	0,44	0,20	0,17	25,0	2210	1,65	0,04	< 5	6350	351869	13,3	65,2	24,3	0,03	0,54
12287	15,5	32,0	13,0	43,1	12,7	0,16	< 20	0,22	28,3	16,2	1,94	0,27	0,99	0,36	17,4	0,13	0,41	112	88,9	2537	0,52	3,19	1,00	0,00	0,12
4769	39,2	6,47	< 5	786	10,2	0,48	453	18,0	64,4	6,11	1,25	0,26	10,2	23,7	17,0	4,58	1,01	70,5	1913	3097	149	24,1	258	0,52	1,36
11279	8,17	15,2	< 5	175	19,4	0,44	18275	14,2	116	7,38	1,99	0,19	8,20	13,5	3,03	2,55	1,50	105	1110	572	193	55,8	67,6	0,14	0,21
4816	5,93	n.d.	< 5	343	2,59	0,13	46,3	0,00	7,52	13,7	0,31	0,08	0,48	653	210	0,49	0,36	6,55	133000	30275	0,78	355	1460	0,00	0,19
11199	94,8	n.d.	< 5	2851	0,63	0,55	121	19,7	1,90	4,51	0,50	0,46	0,35	7,50	1,47	0,91	0,12	< 5	200	183	79,8	4,15	4,91	1,45	0,87
4812	24,7	n.d.	n.d.	495	0,91	0,63	< 20	23,8	0,42	0,46	0,21	0,19	0,30	302	811	0,55	0,16	< 5	86500	140076	269	26,6	95,3	10,4	0,05
11196	4,20	< 5	n.d.	33,9	1,87	56,9	30,7	0,00	10,3	1,48	0,96	0,09	0,09	799	2340	1,14	12,3	8,09	128000	210524	1,08	648	798	0,20	0,09

* ICP-OES vizsgálatból származó eredmény / Measured with ICP-OES

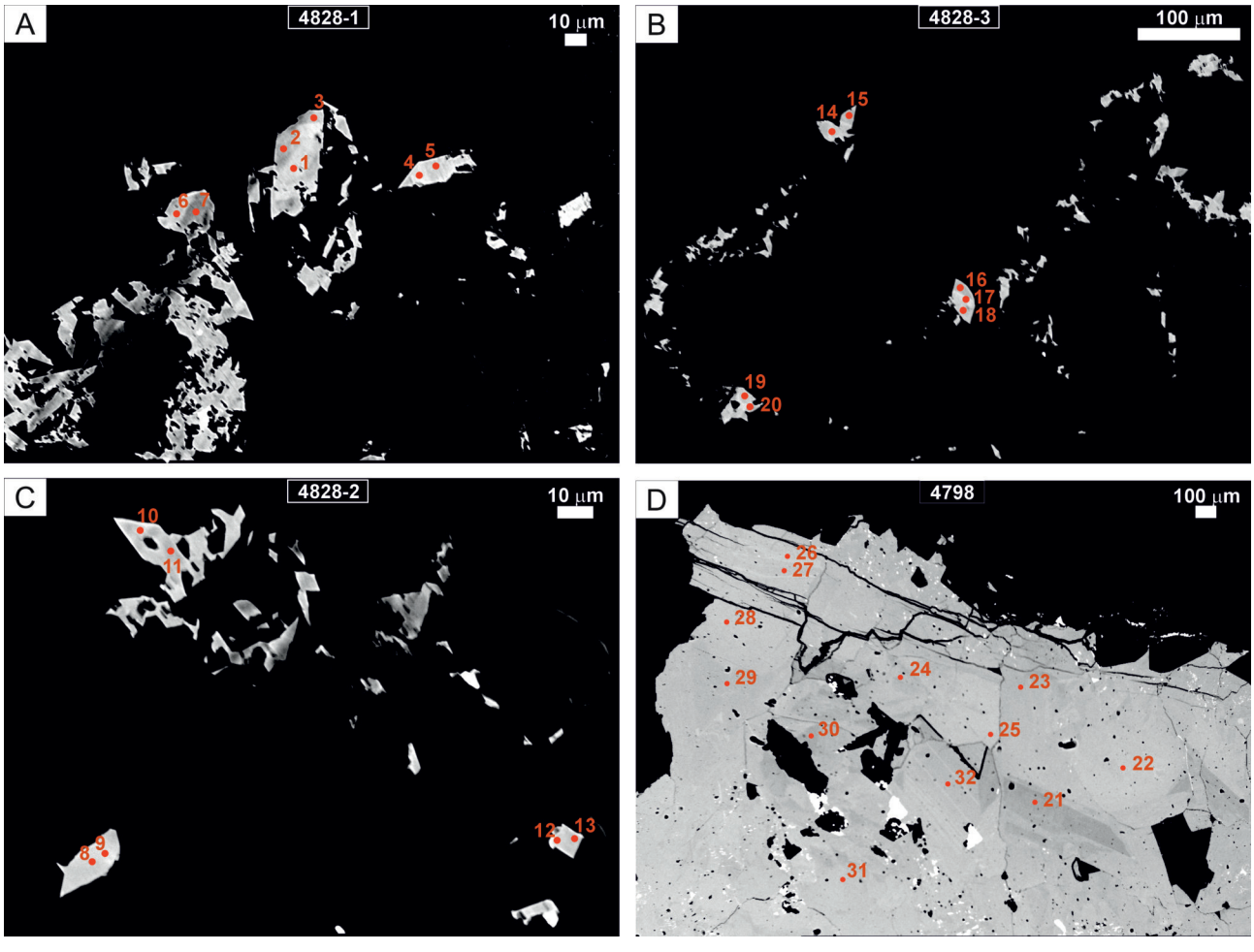
ICP-OES kimutatási határ	1,0	1,0					5,0											1,0		0,2				ICP-OES detection limit	

n.d.: kimutatási határ alatt/below detection limit



2. ábra. Arzenopirit-I és arzenopirit-II mikroszkópos képei. A) A 4798 sz. mintában megfigyelhető arzenopirit-I szöveti képe. B) A 4828 sz. mintában szereplő arzenopirit-II szöveti képe. apy – arzenopirit; Bi – termésbizmut; ccp – kalkopirit; gn – galenit; mrc – markazit; Pb-Bi-S – Pb-Bi-szulfosó; py – pirit; pyh – pirrhotin; sd – sziderit; sp – szfalerit

Figure 2. *Microscopic photo of the two arsenopyrite generations. A) Arsenopyrite-I from the sample 4798. B) Arsenopyrite-II from the sample 4828. apy – arsenopyrite; Bi – native bismuth; ccp – chalcopyrite; gn – galea; mrc – marcasite; Pb-Bi-S – Pb-Bi-sulfosalt; py – pyrite; pyh – pyrrhotite; sd – siderite; sp – sphalerite*



3. ábra. A vizsgált arzenopirites minták visszaszórt elektronképe. A-C) Arzenopirit-II mérési pontjai (1-20). D) Arzenopirit-I mérési pontjai (21-32). A fehér ásványokat termésbizmut, bizmut-szulfid, valamint galenit alkotja

Figure 3. *BSE images of the analyzed arsenopyrite crystals. A-C) Analyzed spots in arsenopyrite-II (1-20). D) Analyzed spots in arsenopyrite-I (21-32). The white minerals are native bismuth, bismuth-sulfide and galena*

Cu-Bi-Au-As-Co-Se-Te-W (*4. ábra*). Ezek a nyomelem-összetételen alapuló agglomeratív hierarchikus klaszterezés során is azonos, de egymástól és a többi elemtől is jól elkülönülő csoportban kötöttek ki. Az elkülönített elemcsoportok hasonlítanak a granitoidintrúziókhoz kapcsolódó porfiros rendszerekben említett elemasszociációkhoz (BAKER et al. 2005, KOŁODZIEJCZYK et al. 2016, JELIĆ et al. 2023, ROWINS 2000, WU et al. 2023), amely igazolja TURI et al. (elbírálás alatt) által elvégzett ércgenetikai felülvizsgálat szükségességét.

Az arzenopirithez genetikailag kapcsolódó elemek azonosítására vizsgáltuk az egyes elemek közötti korrelációt és azok erősségét a Pearson-féle korrelációs együttható segítségével (*IV. táblázat*). A korrelációs mátrix logaritmikus adattranszformációt követően készült.

Az érckoncentrátumokban mért As mennyisége pozitív korrelál az Au (r=0,56), a Bi (r=0,66) és a Co (r=0,75) mennyiségével (*5. ábra, IV. táblázat*). A vizsgált mintákban az arzenopirit az egyetlen As-tartalmú ásvány, így ezek az eredmények alátámasztják az Au és a Bi arzenopirittel való szoros kapcsolatát, ahogy az a TURI et al. (elbírálás alatt) által alkotott ércásvány-paragenezisben is szerepel. Megállapítható továbbá, hogy bár mérhető csekély mennyiségű Co a pirrhotinban (max. 0,009 t%, medián=0,003 t%, n=49) és a piritben is (max. 0,06 t%, medián: 0,003 t%, n=117; TURI et al. elbírálás alatt), nagyobb mértékű dúsulása leginkább arzenopirithez kapcsolódik.

A két arzenopirit generáció nyomelem-összetétele

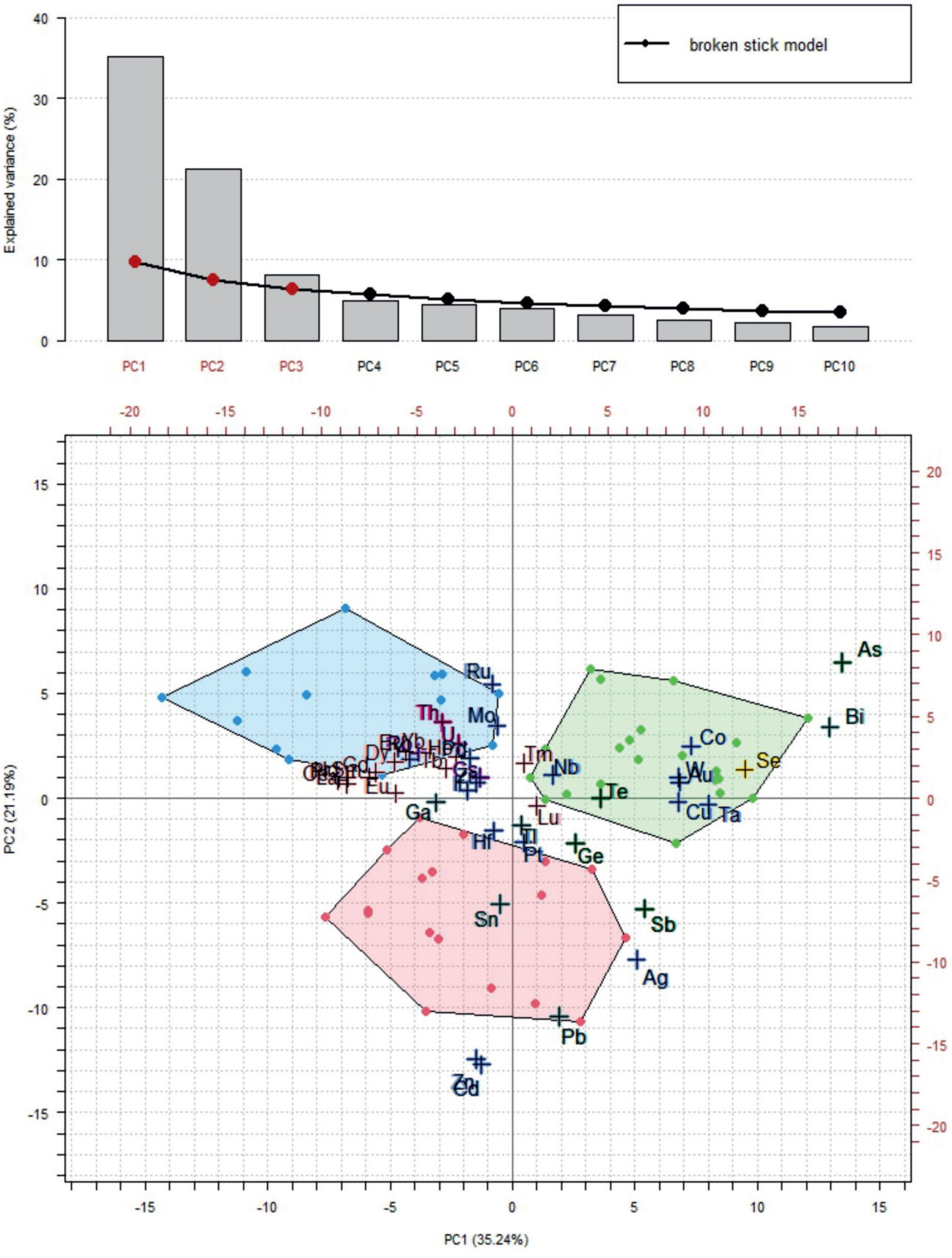
Mindkét típusú arzenopirit tartalmazhat a képletalkotó elemein kívül (Fe, As, S) Co-ot, Ni-t, Sb-t és Au-t, ezek mennyisége azonban eltér a két generáció ásványaiban.

Az arzenopirit-I Co-, Ni-, Sb- és Au-tartalma jellemzően alacsonyabb. A Co mennyisége 0,06 és 3 t% között váltakozik (medián: 0,14 t%, n=11), a Ni mennyisége 0,002 és 0,03 t% között (medián: 0,02 t%, n=11), az Sb mennyisége 0 és 0,04 t% között (medián: 0,009 t%, n=11), míg az Au mennyisége 0 és 0,08 t% között (medián: 0,03 t%, n=11). Az arzenopirit-II nyomelemekben gazdagabb, a Co-tartalom 0,8 és 8,5 t% közötti (medián: 3,28 t%, n=20), a Ni-tartalom 0,01 és 0,7 t% közötti (medián: 0,26 t%, n=20), az Sb-tartalom 0 és 0,3 t% közötti (medián: 0,02 t%, n=20), míg az

III. táblázat. A két arzenopirit generáció mikroszondás mérési eredményei

Table III. *Results of the electronmicroprobe analyses of the two arsenopyrite generations*

	Mérésszám / Analysis No.	(t%) / (wt.%)								(a%) / (at.%)							
		As	S	Fe	Co	Sb	Ni	Au	Total	As	S	Fe	Co	Sb	Ni	Au	Total
arzenopirit-I / aprsenoyrite-I	21	41,01	21,54	34,17	0,06	0,00	0,02	0,00	96,80	29,88	36,66	33,39	0,06	0,00	0,01	0,00	100,00
	22	44,74	19,95	33,49	0,08	0,03	0,02	0,00	98,30	32,79	34,17	32,93	0,08	0,01	0,02	0,00	100,00
	23	42,80	20,06	35,03	0,14	0,00	0,00	0,00	98,04	31,27	34,25	34,34	0,13	0,00	0,00	0,00	100,00
	24	43,86	20,47	35,15	0,14	0,01	0,03	0,00	99,66	31,54	34,40	33,90	0,13	0,01	0,03	0,00	100,00
	25	44,63	20,11	34,28	0,51	0,00	0,01	0,08	99,62	32,27	33,98	33,25	0,47	0,00	0,01	0,02	100,00
	26	44,89	19,76	31,69	3,05	0,04	0,03	0,05	99,50	32,64	33,58	30,91	2,82	0,02	0,02	0,01	100,00
	27	43,97	20,38	35,32	0,16	0,00	0,00	0,00	99,83	31,59	34,22	34,04	0,15	0,00	0,00	0,00	100,00
	28	44,67	19,94	34,18	0,18	0,01	0,02	0,01	99,01	32,52	33,91	33,37	0,17	0,00	0,02	0,00	100,00
	29	43,53	20,62	34,38	0,06	0,00	0,02	0,00	98,60	31,56	34,93	33,44	0,05	0,00	0,02	0,00	100,00
	30	41,85	21,91	35,73	0,18	0,01	0,02	0,00	99,70	29,63	36,25	33,94	0,16	0,00	0,02	0,00	100,00
	31	43,70	20,55	35,38	0,06	0,00	0,01	0,08	99,78	31,37	34,47	34,07	0,05	0,00	0,01	0,02	100,00
	32	42,91	21,08	35,40	0,12	0,03	0,02	0,00	99,57	30,68	35,22	33,95	0,11	0,01	0,02	0,00	100,00
arzenopirit-II / arsenopyrite-II	1	44,74	19,74	28,29	4,88	0,00	0,68	0,00	98,33	32,93	33,94	27,93	4,57	0,00	0,64	0,00	100,00
	2	44,48	19,21	33,49	0,84	0,05	0,15	0,00	98,21	32,80	33,11	33,13	0,79	0,02	0,14	0,00	100,00
	3	43,92	20,64	26,63	7,50	0,00	0,55	0,03	99,27	31,80	34,92	25,86	6,90	0,00	0,51	0,01	100,00
	4	45,90	19,35	30,28	3,89	0,11	0,32	0,00	99,85	33,47	32,97	29,61	3,60	0,05	0,30	0,00	100,00
	5	45,09	19,67	32,54	1,00	0,09	0,22	0,00	98,62	33,07	33,72	32,02	0,93	0,04	0,21	0,00	100,00
	6	44,79	19,82	33,73	0,93	0,05	0,05	0,01	99,37	32,54	33,65	32,88	0,86	0,02	0,04	0,00	100,00
	7	41,72	21,50	25,69	8,06	0,00	0,33	0,03	97,31	30,43	36,65	25,14	7,47	0,00	0,30	0,01	100,00
	8	45,51	19,59	32,93	1,90	0,02	0,17	0,10	100,21	32,94	33,14	31,97	1,75	0,01	0,15	0,03	100,00
	9	45,35	19,23	28,37	5,79	0,09	0,37	0,05	99,24	33,29	32,98	27,93	5,40	0,04	0,34	0,01	100,00
	10	43,89	20,34	29,63	5,22	0,12	0,28	0,04	99,52	31,75	34,38	28,75	4,80	0,05	0,26	0,01	100,00
	11	43,89	20,15	33,91	0,79	0,02	0,14	0,01	98,91	31,88	34,21	33,04	0,72	0,01	0,13	0,00	100,00
	12	44,71	20,07	31,87	2,67	0,00	0,47	0,03	99,82	32,31	33,89	30,90	2,45	0,00	0,44	0,01	100,00
	13	44,73	19,81	33,08	1,62	0,00	0,26	0,05	99,55	32,46	33,60	32,20	1,49	0,00	0,24	0,01	100,00
	14	44,68	20,53	34,37	0,89	0,00	0,02	0,00	100,48	31,94	34,29	32,95	0,80	0,00	0,01	0,00	100,00
	15	41,84	21,98	26,13	8,53	0,00	0,26	0,00	98,74	30,01	36,84	25,14	7,78	0,00	0,24	0,00	100,00
	16	41,84	21,98	26,67	8,45	0,00	0,22	0,12	99,28	29,88	36,67	25,55	7,67	0,00	0,20	0,03	100,00
	17	44,84	19,53	27,70	6,11	0,26	0,47	0,02	98,94	32,93	33,51	27,29	5,71	0,12	0,44	0,01	100,00
	18	44,88	19,74	33,55	0,89	0,05	0,32	0,00	99,42	32,62	33,52	32,71	0,82	0,02	0,30	0,00	100,00
	19	44,91	20,18	33,72	0,99	0,02	0,26	0,00	100,08	32,33	33,95	32,56	0,91	0,01	0,24	0,00	100,00
	20	42.11	21.40	27.90	6.59	0.05	0.26	0.02	98.33	30.45	36.16	27.06	6.06	0.02	0.24	0.01	100.00



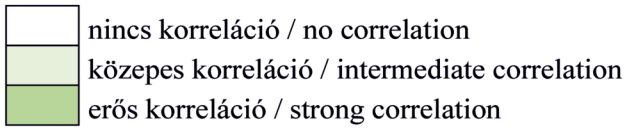
4. ábra. Az érckoncentrátumokban mért nyomelemek mennyiségi adatain végzett főkomponens-analízis (PCA) eredménye kettős szórásdiagramon bemutatva. Az eredeti változókhoz tartozó vektorok végpontjait kereszt jelöli

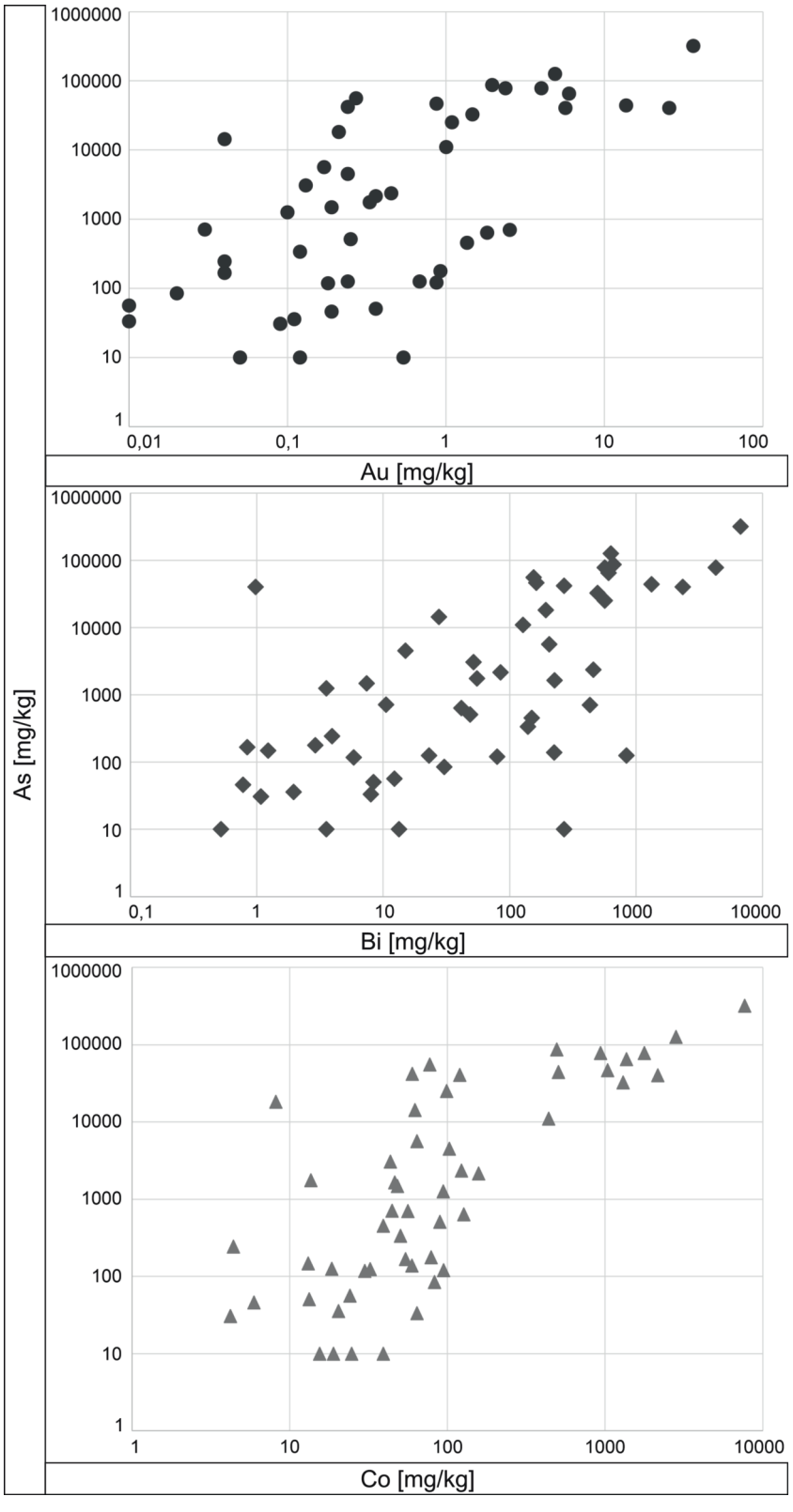
Figure 4. *Results of the Principal Component Analysis (PCA) performed on the trace element data measured from the ore concentrates shown on a biplot. Vector endpoints are indicated by crosses*

IV. táblázat. Az érckoncentrátumok nyomelemzési eredményeinek logaritmikus transzformációja után előállított korrelációs mátrixa

Table IV. *Correlation matrix of the trace elements in the ore concentrates, after logarithmic transformation*

	Co	Cr	Ni	Cu	Ga	Ge	As	Se	Rb	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	W	Tl	V	Pb	Zn	Bi	Sn	Sb	Te	Au
Co	1																								
Cr	-0,07	1																							
Ni	0,63	0,18	1																						
Cu	0,37	-0,30	0,19	1																					
Ga	-0,05	0,69	0,16	-0,34	1																				
Ge	0,20	-0,12	0,09	0,15	-0,07	1																			
As	0,75	-0,06	0,46	0,40	-0,23	0,12	1																		
Se	0,64	-0,07	0,36	0,54	-0,17	-0,03	0,53	1																	
Rb	0,03	0,77	0,20	-0,30	0,87	-0,09	-0,01	-0,13	1																
Y	-0,08	0,51	0,10	-0,39	0,70	-0,27	-0,15	-0,20	0,77	1															
Zr	-0,06	0,60	0,11	-0,29	0,66	0,03	-0,15	-0,07	0,73	0,54	1														
Nb	0,36	0,05	0,40	0,12	0,11	-0,16	0,23	0,38	0,15	0,19	0,31	1													
Mo	0,19	0,56	0,26	-0,17	0,60	-0,40	0,13	0,15	0,69	0,62	0,43	0,31	1												
Ag	0,07	-0,32	-0,12	0,30	-0,12	0,55	0,12	-0,17	-0,16	-0,28	-0,18	-0,39	-0,36	1											
Cd	-0,19	-0,10	-0,19	-0,13	0,29	0,37	-0,31	-0,34	0,06	0,02	0,08	-0,33	-0,32	0,59	1										
W	0,56	-0,23	0,18	0,55	-0,27	0,20	0,59	0,55	-0,18	-0,25	-0,08	0,28	0,01	0,24	-0,19	1									
Tl	-0,03	0,29	-0,11	-0,20	0,26	0,47	0,11	-0,25	0,41	0,31	0,38	-0,15	0,09	0,33	0,24	0,12	1								
V	-0,08	0,81	0,12	-0,43	0,84	-0,04	-0,14	-0,21	0,92	0,74	0,71	0,06	0,62	-0,21	0,09	-0,31	0,40	1							
Pb	-0,13	-0,15	-0,23	-0,01	0,09	0,48	-0,12	-0,31	-0,01	-0,10	-0,02	-0,48	-0,31	0,88	0,79	-0,01	0,39	0,02	1						
Zn	-0,21	-0,08	-0,19	-0,13	0,30	0,33	-0,32	-0,33	0,07	0,04	0,09	-0,33	-0,30	0,58	1,00	-0,21	0,23	0,11	0,79	1					
Bi	0,68	-0,23	0,28	0,57	-0,32	0,08	0,66	0,75	-0,27	-0,43	-0,26	0,33	0,04	0,15	-0,33	0,70	-0,21	-0,38	-0,15	-0,34	1				
Sn	-0,23	0,03	-0,03	0,05	0,38	0,36	-0,18	-0,42	0,28	0,22	0,11	-0,35	-0,02	0,58	0,58	-0,13	0,36	0,20	0,59	0,58	-0,36	1			
Sb	0,25	-0,29	0,06	0,07	-0,08	0,37	0,38	-0,20	-0,07	-0,20	-0,26	-0,29	-0,12	0,74	0,41	0,18	0,33	-0,13	0,64	0,40	0,16	0,45	1		
Te	0,57	-0,37	0,05	0,37	-0,38	0,22	0,53	0,47	-0,34	-0,42	-0,33	-0,02	-0,10	0,25	-0,11	0,45	-0,14	-0,37	0,00	-0,13	0,68	-0,19	0,29	1	
Au	0,58	-0,13	0,34	0,38	-0,12	0,00	0,56	0,41	-0,03	-0,06	-0,06	0,42	0,16	0,00	-0,22	0,40	-0,06	-0,16	-0,25	-0,24	0,45	-0,15	0,23	0,35	1





5. ábra. Az érckoncentrátumokban mért As mennyiségének viszonya az Au-, a Bi- és a Co-tartalommal
Figure 5. *Relationship of the As content with the amount of Au, Bi and Co, measured in the ore-concentrates*

Au-tartalom 0 és 0,1 t% között változik (medián: 0,03 t%, n=20). A nyomelem többlete származhat az arzenopirit-II előtti ásványokból, például arzenopirit-I-ből (Au, Co) és/vagy pirrhotinból (Co, Ni).

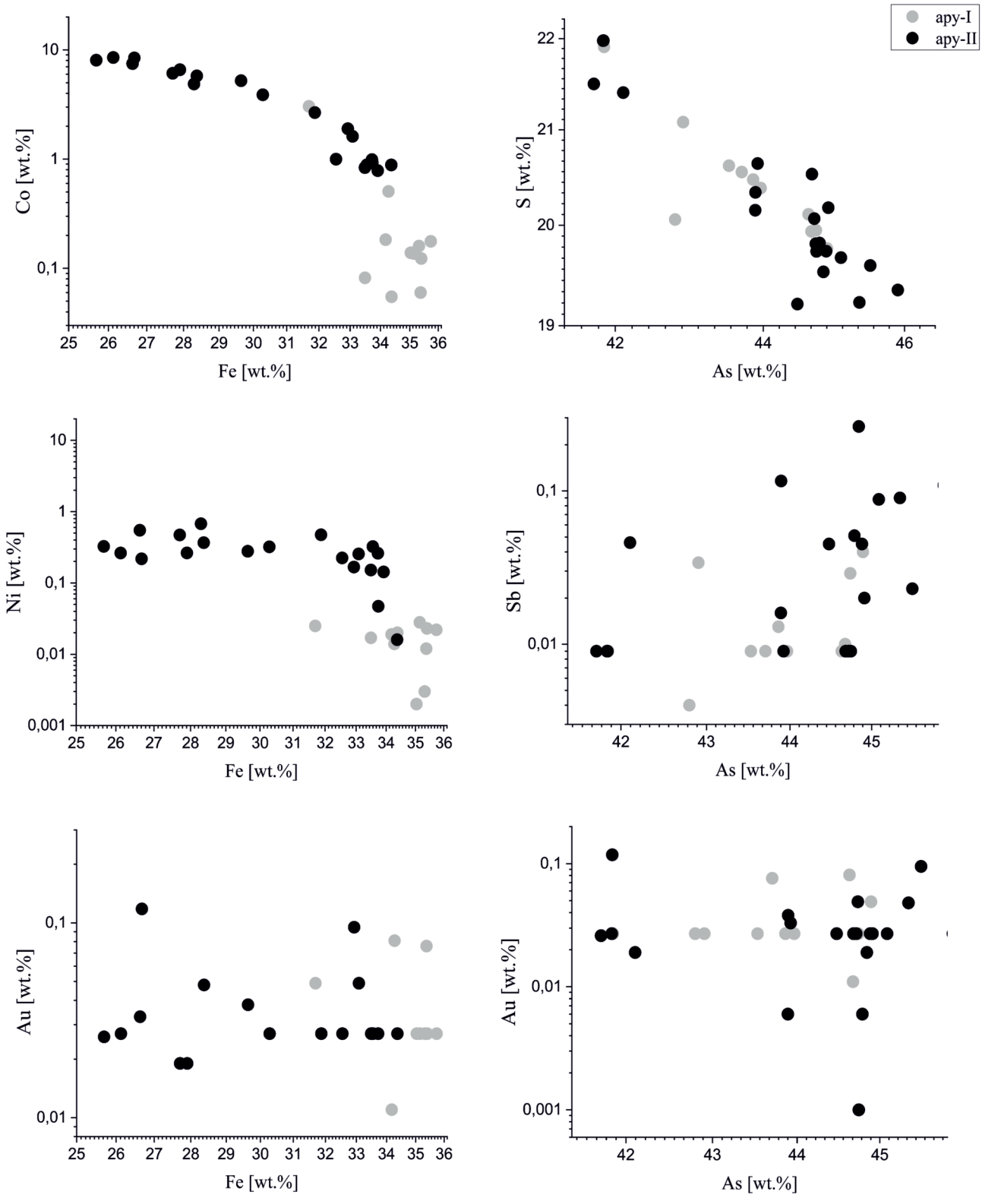
A Co és a Ni jellemzően a Fe^{2+} helyére épül be az ásvány szerkezetébe. A vizsgált mintákban a Fe mennyisége, illetve a Co (r=-0,87) és a Ni (r=-0,7) mennyisége közötti negatív korreláció is ezt a közvetlen helyettesítési mechanizmust támasztja alá (*6. ábra, V. táblázat*). Az arany szerkezetben kötött előfordulása esetén a vassal negatív, az arzénnel pozitív korrelációra számíthatnánk (POKROVSKI et al. 2002, 2021). Az Au azonban nem mutat korrelációt sem a Fe (r=0,04), sem az As (r=-0,09) esetében (*6. ábra, V. táblázat*), ami arra utal, hogy az Au jelentősebb része nanozárványként van jelen az arzenopiritben. Mindazonáltal az eredmények alapján nem zárható ki szerkezetben kötött arany előfordulása sem.

Bár az elektronmikroszondás vizsgálatok során nem került sor az arzenopirit Te- és Se- tartalmának elemzésére, a korrelációs vizsgálatok alapján ennek pótlása indokolt lehet.

Az arzenopirit geotermométer alkalmazhatósága

Az arzenopiritben lévő As és S közötti korlátozott mértékű helyettesítés régóta ismert, amelyet a mintáinkban mért As- és S-tartalom közötti negatív korreláció (r=-0,91) is tükröz (*6. ábra, V. táblázat*). Az arzenopirit arzén- és kéntartalma függ az ásvány keletkezési hőmérsékletétől és az ércképző rendszer kénfugacitásától. Ha a kénfugacitás az arzenopirittel egyensúlyban lévő más ásványfázisok segítségével megbecsülhető (pl. löllingit, pirrhotin, pirit, magnetit), akkor az As atom %-os mennyisége alapján meghatározható az arzenopirit keletkezési hőmérséklete (KRETSCHMAR & SCOTT 1976). Az arzenopirit geotermométerként való alkalmazása problémás, ha az ásvány zónás, vagy inhomogén, illetve ha a teljes nyomelemtartalma meghaladja az 1 atom%-ot (MIKULSKI 2005, NAYAK et al. 2021).

A központi területről származó arzenopirit-kristályok nyomelemtartalma jelentős, 0,07 és 8 atom% között változik (*III. táblázat*). A pirrhotin előtti arzenopirit-I generáció 11 mérési pontjából 10 esetében kevesebb a mért teljes nyomelemtartalom 1 atom%-nál (átlag 0,16 atom%). A keletkezési hőmérséklet azonban nem becsülhető meg az arze-



6. ábra. Az arzenopirit két generációjában mért elemarányok. apy – arzenopirit

Figure 6. *Relationship between the major and trace elements of the arsenopyrite generations. apy – arsenopyrite*

nopirittel kiváló egyéb egyensúlyi ásványfázisok hiánya, valamint az ásvány nagyfokú inhomogenitása miatt. A későbbi kiválású arzenopirit-II generáció ásványai szintén inhomogének, illetve nyomelemekben gazdagabbak. A 20 mérési pontból mindössze 4 pontban volt kevesebb 1 atom%-nál a mért nyomelemtartalom, és azokban sem jelentősen (átlag 0,89 atom%), így ebben az esetben is kétséges az arzenopirit geotermométerként való alkalmazása.

V. táblázat. Az arzenopiritben mért elemek korrelációs mátrixa az adatok logaritmikus transzformációja után

Table V. *Correlation matrix of the elements measured in the arsenopyrite, after logarithmic transformation of the data*

	As	S	Fe	Co	Sb	Ni	Au
As	1						
S	-0,91	1					
Fe	0,27	-0,26	1				
Co	-0,01	0,03	-0,87	1			
Sb	0,43	-0,47	-0,20	0,33	1		
Ni	0,14	-0,10	-0,70	0,81	0,42	1	
Au	-0,09	0,16	0,04	-0,03	-0,01	-0,15	1

nincs korreláció / no correlation
erős pozitív korreláció / strong positive correlation
erős negatív korreláció / strong negative correlation

Következtetések

A börzsönyi Rózsabánya ércesedéséből származó érckoncentrátumok nyomelemvizsgálata alapján megállapítható, hogy az ércesedésben megjelenő kritikus elemek (Co, Bi, As), valamint az Au kiválása leginkább az arzenopirit kristályosodását okozó folyamatokhoz kapcsolódik.

A vizsgált minták arzenopirit típusainak eltérő nyomelem-karakterisztikája egyértelműen alátámasztja, hogy a két eltérő szöveti megjelenésű arzenopirit-I és -II típus az ércesedés kialakulásának különböző szakaszában kristályosodott. Az arzenopirit-I nagyobb kristályméretű, porózus szövetű, és nyomelemekben (Co, Ni, Sb, Au) szegényebb. Ezzel szemben az arzenopirit-II kis kristályméretű, valamint Co-, Ni-, Sb- és Au-tartalma is magasabb a korábbi kiválású arzenopiritben mérthez képest. Az arzenopirit-II esetében tapasztalt dúsulást okozhatta az ércképző rendszer változásai által a korábbi kiválású ásványokból remobilizált elemek beépülése.

Az arzenopirit nyomelemarányai (Co+Ni-As, As-Au, Fe-Au) arra utalnak, hogy a Co és a Ni a Fe helyettesítése révén beépülnek az ásvány szerkezetébe, míg az arany főként nanozárványként, illetve kisebb mértékben szerkezetben kötött módon lehet jelen az arzenopiritben.

Az inhomogén kémiai összetétel, a magas nyomelemtartalom és egyértelműen az arzenopirittel együtt kristályosodó egyéb szulfidok hiányában az arzenopiritből származó mérési eredmények nem alkalmasak az ásvány keletkezési hőmérsékletének meghatározására.

Köszönetnyilvánítás

Cikkünkkel WEISZBURG Tamás szakmai és oktatásszervezői munkássága iránti tiszteletünket szeretnénk kifejezni. Mindezek mellett köszönjük a hallgatók és a kollégák felé töretlenül tanúsított segítőkész és emberséges hozzáállását, amely csendes, de annál fontosabb támasz a kutatói lét kihívásokkal teli időszakaiban.

Az elektron-mikroszondás mérések az SZTFH finanszírozásával valósultak meg. A szerzők köszönetüket fejezik ki az SZTFH Földtani és Laboratóriumi Osztály dolgozóinak az érckoncentrátum minták előkészítéséért, valamint az ICP-OES és az ICP-MS mérések elvégzéséért. Köszönet illeti Monika FEICHTERt, a Leobeni Egyetem kutatóját a mikroszondás vizsgálatokban való közreműködéséért. Köszönet illeti továbbá KOVÁCS KIS Viktóriát, ZAJZON Norbertet és az anonym bírálót, akik értékes észrevételeikkel emelték a kézirat színvonalát.

Irodalom

BAKER, T., POLLARD, P. J., MUSTARD, R., MARK, G. & GRAHAM, J. L. 2005: A Comparison of Granite-Related Tin, Tungsten, and Gold-Bismuth Deposits: Implications for Exploration. – *SEG Discovery* **61**, 5–17. http://dx.doi.org/10.5382/SEGnews.2005-61.fea

BENKÓ, Z., BUGLEDITS, É. & RÉCSI, A. 2012: Ductile and brittle deformations in the Sopron Gneiss Formation (Sopron Mts., W-Hungary) and their implication on the formation of the Pannonian Basin. – *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues* **56/2**, 3–19. http://dx.doi.org/10.1127/0372-8854/2012/S-00082

CSILLAGNÉ TEPLÁNSZKY E., CSONGRÁDI J., KORPÁS L., PENTELÉNYI L. & VETŐNÉ ÁKOS É. 1983: A Börzsöny hegység központi területének földtani felépítése és ércesedése. – *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1981. Évről,* 77–127.

CSONTOS, L. & VÖRÖS, A. 2004: Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **210/1**, 1–56. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.033

DÓDONY I. 1990: *Börzsönyi, budai és telkibányai érces zónák ásványainak reális szerkezeti és fluidzárvány vizsgálata. (Telkibánya, Börzsöny-Rózsabánya, Rudabánya, Buda-Pilisi hegység, Nagybörzsöny, Szentendrei hegység, Karancs).* – Kutatási jelentés, T.16884, ELTE Ásványtani Tanszék, Budapest

FLEET, M. E. & MUMIN, A. H. 1997: Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis. – *American Mineralogist* **82/1–2**, 182–193. https://doi.org/10.2138/am-1997-1-220

GENKIN, A. D., BORTNIKOV, N. S., CABRI, L. J., WAGNER, F. E., STANLEY, C. J., SAFONOV, Y. G., MCMAHON, G., FRIEDL, J., KERZIN, A. L. & GAMYANIN, G. N. 1998: A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation. – *Economic Geology* **93/4**, 463–487. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.463

HARANGI, SZ., DOWNES, H., KÓSA, L., SZABÓ, CS., THIRLWALL, M. F., MASON, P. R. D. & MATTEY, D. 2001: Almandine Garnet in Calc-

alkaline Volcanic Rocks of the Northern Pannonian Basin (Eastern–Central Europe): Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Implications. – *Journal of Petrology* **42/10**, 1813–1843. https://doi.org/10.1093/petrology/42.10.1813

Harangi, S., Downes, H. & Seghedi, I. 2006: Tertiary-Quaternary subduction processes and related magmatism in the Alpine-Mediterranean region. – *Geological Society, London, Memoirs* **32/1**, 167–190. https://doi.org/10.1144/gsl.mem.2006.032.01.10

Harangi, S., Seghedi, I. & Lukács, R. 2024: The Neogene–Quaternary volcanism of the Carpathian–Pannonian region: from initial plate tectonic models to quantitative petrogenetic explanations. – *Geological Society, London, Special Publications* **554/1**, SP554-2024–84. https://doi.org/10.1144/sp554-2024-84

Jelić, I., Zavašnik, J., Lazarov, M., Zdravković, A., Kovač, S., Stojanović, J. & Pačevski, A. 2023: Micro- to nanoscale textures of gold in arsenopyrite and scorodite from the As-Au-Bi assemblage of Drenjak locality (Serbia). – *Ore Geology Reviews* **163**, 105711. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105711

Karátson, D., Márton, E., Harangi, S., Józsa, S., Balogh, K., Pécskay, Z., Kovácsvölgyi, S., Szakmány, G. & Dulai, A. 2000: Volcanic evolution and Stratigraphy of the Miocene Börzsöny Mountains, Hungary: an Integrated Study. – *Geologica Carpathica* **51/5**, 325–343.

Kołodziejczyk, J., Pršek, J., Voudouris, P., Melfos, V. & Asllani, B. 2016: Sn-Bearing Minerals and Associated Sphalerite from Lead-Zinc Deposits, Kosovo: An Electron Microprobe and LA-ICP-MS Study. – *Minerals* **6/2**, 42. https://doi.org/10.3390/min6020042

Korpás, L. & Lang, B. 1993: Timing of volcanism and metallogenesis in the Börzsöny Mountains, Northern Hungary. – *Ore Geology Reviews* **8/6**, 477–501. https://doi.org/10.1016/0169-1368(93)90041-v

Korpás L., Csillagné Teplánszky E., Hámor G., Ódor L., Horváth I., Fügedi U. & Harangi S. 1998: Magyarázó a Börzsöny és a Visegrádi-hegység földtani térképéhez 1:50000; *Magyar Állami Földtani Intézet Térképmagyarázói,* MÁFI, Budapest, p. 216.

Kretschmar, U. & Scott, A. 1976: Phase Relations Involving Arsenopyrite in the System Fe-As-S and Their Application. – *Canadian Journal of Earth Sciences* **14**, 364–386.

Lukács, R., Harangi, S., Guillong, M., Bachmann, O., Fodor, L., Buret, Y., Dunkl, I., Sliwinski, J., von Quadt, A., Peytcheva, I., & Zimmerer, M. 2018: Early to Mid-Miocene syn-extensional massive silicic volcanism in the Pannonian Basin (East-Central Europe): Eruption chronology, correlation potential and geodynamic implications. – *Earth-Science Reviews* **179**, 1–19. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.005

Mann, M. F. 2017: *An examination of the pyrite-gold and arsenopyrite-gold systems : implications for hydrothermal gold deposits.* – Graduate Research Theses & Dissertations, Northern Illinois University, 150 p. https://huskiecommons.lib.niu.edu/allgraduate-thesesdissertations/1268

Mikulski, S. 2005: The arsenopyrite geothermometer - a difficult application to arsenopyrite from the Radzimowice abandoned Au-As-Cu deposit (Kaczawa Mountains). – *Mineralogia Polonica Special Papers,* **26**, 207-210.

Nagy B. 1984: A nagybörzsönyi érckutatás és ércbányászat története. – *Földtani Közlöny* **114/3**, 387–403.

Nagy B. 1990: Nagyirtáspusztai ércesedés (Börzsöny hegység). – *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1988. Évről, I. rész*, 277–325.

Nayak, B., Sindern, S. & Wagner, T. 2021: Formation of late-stage hydrothermal mineralization in the Mesoarchean Boula-Nuasahi ultramafic complex, Odisha, India: Constraints from arsenopyrite geothermometry and trace element data. – *Ore Geology Reviews* **139**, 104482. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104482

Pantó G., Pantó D. & Mikó L. 1960: *Zárójelentés a nagybörzsönyi szinesfém és nemesfémérc előfordulás földtani és bányászati kutatásáról.* – Kutatási zárójelentés, T.1782, MÁFI, Budapest

Pentelényi L. & Vetőné Ákos É. 1996: *A Börzsöny-hegységi epitermális-teléres, nemes- és szinesércesedés leíró genetikai modellje.* – Jelentés, T.17637, MÁFI, Budapest

Pokrovski, G. S., Kara, S. & Roux, J. 2002: Stability and solubility of arsenopyrite, FeAsS, in crustal fluids. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* **66/13**, 2361–2378. https://doi.org/10.1016/s0016-7037(02)00836-0

Pokrovski, G. S., Escoda, C., Blanchard, M., Testemale, D., Hazemann, J.-L., Gouy, S., Kokh, M. A., Boiron, M.-C. & Doert, T. 2021: An arsenic-driven pump for invisible gold in hydrothermal systems. – *Geochemical Perspectives Letters* **17**, 39–44. https://doi.org/10.7185/geochemlet.2112

R Core Team 2025: R: A Language Environment for Statistical Computing. – *R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.* www.R-project.org

Rowins, S. M. 2000: Reduced porphyry copper-gold deposits: A new variation on an old theme. – *Geology* **28/6**, 491. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28%3C491:RPCDAN%3E2.0.CO;2

Scott, S. D. 1983: Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments. – *Mineralogical Magazine* **47/345**, 427–435. https://doi.org/10.1180/minmag.1983.047.345.03

Turi J., Cseresznyés D. & Virág A. 2024: A Börzsöny hegységi Rózsabánya ércesedésének újraértelmezése többváltozós statisztikai módszerek és termodinamikai modellezés segítségével. – *In:* Buday T., Csámer, Á., McIntosh, R., Molnár K. & Virág A. (szerk.): *Ahány kő, annyi történet. 14. Kőzettani és Geokémiai Vándorgyűlés előadás- és poszterkivonatok*. – HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen, 105–109.

Turi, J., Török, K., Benkó, Z. & Bertrandsson Erlandsson, V. (elbírálás alatt): A three-stage mineralization formation model of a reduced porphyry-copper deposit in the Börzsöny Mountains, NE Hungary: evidence from sulfide associations and geochemistry.

Wu, X., Zhao, J., Liu, W., Xie, G., Ye, Z., Li, Z. & Sun, H. 2023: Tin mineralization in the giant Shuangjianzishan Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia. – *Ore Geology Reviews* **152**, 105241. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105241

Kézirat beérkezett: 2026. 05. 22.