

Az infravörös mikroszkópia alapjai és alkalmazása opak ásványok fluidumzárvány vizsgálatában

TAKÁCS Ágnes, MOLNÁR Ferenc

ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Ásványtani Tanszék; 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

Basic principles of infrared microscopy and its application in fluid inclusion studies of opaque minerals

Abstract

Nowadays fluid inclusion petrography and microthermometry are widely applied techniques for investigating various geological processes. The most common minerals in the process of fluid inclusion microthermometry are primarily quartz, calcite and other transparent minerals. However, many minerals in the 400–700 nm wavelength (visible light) range are opaque. The IR radiation has lower energy than the visible light and therefore its energy is not large enough to excite the movement of an electron from the valence band to the conduction band; thus the light is not absorbed by the mineral. Consequently, the mineral is transparent in IR light. Several opaque minerals — such as pyrite, enargite, stibnite, molybdenite, haematite, etc. — have been found to be transparent in IR light. Microthermometric studies on these minerals have indicated that their fluid inclusions acted in such a way as to preserve certain stages of the geological processes; otherwise, these could not have been reconstructed on the basis of conventional studies of fluid inclusions in transparent minerals. The IR microscopy and microthermometry have recently been introduced into routine practice in the fluid inclusion laboratory of the Department of Mineralogy at the Eötvös Loránd University. The calibration measurements indicate that the “green house effect” on fluid inclusions in enargite — which is caused by the thermal energy of the IR radiation — does not reach the extent of that limit which could effect the geological interpretations of microthermometry data. This can be explained by the properties of the analytical system, given that all the instruments have been optimized for the transmission of the IR radiation.

IR microscopy and microthermometry represent a powerful new field for fluid inclusion microthermometry and could open up new areas for the study of various geological processes.

Keywords: infrared microscopy and microthermometry, opaque minerals

Összefoglalás

A normál fehér fényben átlátszó ásványok fluidumzárványainak mikrotermometriai vizsgálatát a földtani kutatások számos területén alkalmazzuk. Opak ásványokon azonban egészen az utóbbi időig nem lehetett rutinjelleggel ilyen vizsgálatokat végezni. Az infravörös sugárzás kisebb energiájú, mint az emberi szem számára látható normál fény (400–700 nm), ezért a kicsi tiltott sáv energiával rendelkező opak ásványokban nem indukál elektronátmenetet, azaz nem abszorbeálódik. Az ilyen tulajdonságú opak ásványok (például pirit, enargit, antimonit, hematit, molibdenit stb.) tehát átlátszóak infravörös fényben. Az opak ásványok infravörös fényben végzett mikrotermometriai vizsgálatainak eredményei bizonyították, hogy ezen ásványok fluidumzárványai egy-egy földtani folyamat olyan hőmérséklet, nyomás és oldatösszetétel jellemzőit is őrzik, melyeket nem ismerhetnénk meg, ha az adott földtani környezetben csak átlátszó ásványok fluidumzárványait tanulmányoznánk.

Az infravörös mikroszkópia és mikrotermometria eddig kizárólag külföldi intézményekben volt hozzáférhető, azonban az ELTE Ásványtani Tanszékének fluidumzárvány laboratóriumában a 2010-es év elején beüzemeltünk egy olyan új mikrotermometriai berendezést, melynek segítségével már itthon is lehet ilyen irányú vizsgálatokat végezni. Az újonnan felállított rendszeren elvégzett kalibrációs mérések alapján kizárható, hogy a vizsgálatnál jól ismert „üvegházhatás” jelentősen befolyásolná az eredményeket, és ezáltal az adatok földtani értelmezését. Ez az „üvegházhatás” abból a termálisthermia-többletből ered, mellyel a fény infravörös tartománya rendelkezik, és amit az általa átvilágított zárvánnyal közöl. Szemben számos külföldi laboratórium infravörös rendszerével, jelen esetben elhanyagolható a mérési eredmények direkt korrekciója, mivel az „üvegházhatás” okozta hőmérsékletkülönbség a valós és a mért értékek között

nem éri el azt a határt, ami már befolyásolná a földtani értelmezést. Ennek feltételezhetően az oka az, hogy az itthon felállított rendszer az infravörös fény átengedésére optimalizált műszerekből áll.

Az infravörös mikroszkópia és mikrotermometria új utakat nyithat a hazai kutatásokban is, melyhez az ELTE Ásványtani Tanszékén felállított rendszer hatékony és megbízható műszeres háttérrel biztosít.

Tárgyszavak: infravörös mikroszkópia és mikrotermometria, opak ásványok

Bevezetés

Az ásványok fluidumzárványainak mikrotermometriai vizsgálata Magyarországon az 1970-es évek végétől kezdve a földtani kutatások számos területén (nyersanyag-, és szénhidrogén telepek kutatása, fluidáramlási rendszerek modellezése, diagenetikus folyamatok jellemzése, köpeny- és olvadékszárványok vizsgálata) sikeresen alkalmazott vizsgálati módszer. A fluidumzárványok mikrotermometriai vizsgálata során a hőmérsékletváltozás hatására bekövetkező fázisátalakulásokat figyeljük meg a kristályokban csapódzó fluidumzárványokban. A hőmérséklet emelésével a zárványban bezáródott fluidum homogenizációs hőmérsékletére vagyunk kíváncsiak, azaz arra a hőmérsékleti pontra, ahol a zárványban lévő, eltérő halmazállapotú fázisok egyetlen halmazállapotú fázissá alakulnak (T_{hom}). Ez az érték általában a fluidum csapódási hőmérséklet minimum értékét adja meg. Ha mélyebb földtani környezetben ment végbe a befogódás, szükség van a kapott hőmérséklet nyomáskorrekciójára. Ez a korrekció a felszín közeli befogódás, illetve heterogén fázisállapotú anyagra esetén elhanyagolható, illetve nem szükséges (ROEDDER 1984).

A hőmérséklet csökkentésével (krioszkópos vizsgálat) a zárványokat fagyáspontig hűtjük, majd lassan elkezdjük visszamelegíteni. Sólidos zárványok esetében az első olvadékcsepp (elektrolit-hidrát megolvadása) az eutektikus hőmérsékleten jelenik meg. Az eutektikus hőmérséklet alapján a zárvány oldatának összetételére lehet következtetni. A zárványt tovább melegítve megfigyeljük az utolsó jégkristály elolvadásának pillanatát is (T_{melt}). Ebből a hőmérsékletből a fluidum sókoncentrációja számolható ki (BROWN 1989). Egyéb (pl. CO_2 , CH_4 , H_2S stb) komponenseket tartalmazó fluidumzárványok esetében a krioszkópos vizsgálatok során szintén összetétel- és koncentrációfüggő, de bonyolultabb fázisátalakulási jelenségeket tapasztalhatunk.

A mikrotermometria alkalmazhatóságának egyik korlátját az ásványok átláthatósága adja, mivel eddig csak olyan ásványokon lehetett fluidumzárvány vizsgálatokat végezni, melyek normál fényben átlátszóak. Az utóbbi évek technikai fejlődése azonban olyan ásványok fluidumzárvány vizsgálatát is lehetővé tette, melyek ugyan az emberi szem számára látható fényben nem átlátszóak (egyszerűsítve ezek az opak ásványok), de infravörös fényben azzá tehetőek (CAMPBELL et al. 1984, LÜDERS 1996, LINDAAS et al. 2002, KOUZMANOV et al. 2010). Az elmúlt évben az ELTE Földrajz- és Földtudomány Intézet Ásványtani Tanszék fluidumzárvány laboratóriuma egy olyan új rendszerrel bővült, melynek segítségével lehetővé vált a

fluidumzárványok mikrotermometriai vizsgálata opak ásványokban is. A következőkben egy átfogó képet kívánunk adni az infravörös mikroszkópia és mikrotermometria alapjairól, alkalmazási lehetőségeiről valamint az ELTE Ásványtani Tanszékén felállított rendszer alkalmazhatóságáról.

Kutatástörténet

Az első infravörös mikroszkópos megfigyeléseket opak ásványokon LECOMTE (1928) végezte, mely során molibdenit és antimonit ásványtani és optikai tulajdonságait vizsgálta. Ezt számos hasonló munka követte, melyekben különböző opak ásványok optikai tulajdonságait és paramétereit (pl. abszorpciós koeficiens) határozták meg (CAMPBELL et al. 1984). Az első, fluidumzárványokkal is foglalkozó munka CAMPBELL és szerzőtársai 1984-es tanulmánya volt, melyben a már szokásos ásványtani megfigyeléseket fluidumzárvány petrográfiával egészítették ki. Wolframit-, tennantit- és tetraedritkristályokban figyeltek meg folyadék- és gőzfázist tartalmazó zárványokat, melyeken még mikrotermometriai vizsgálatokat ugyan nem végeztek, de kifejtették annak lehetőségét és fontosságát. Ezt követően CAMPBELL & ROBINSON-COOK 1987-ben közölték az első olyan mikrotermometriai adatokat, melyeket opak ásvány fluidumzárványain határoztak meg. Munkájukban két lelőhelyről származó wolframitkristály fluidumzárványaiból kapott homogenizációs és sótartalom-értékeket, a szingenetikusként ítélt kvarckristályokban mért hasonló adatokkal vetették össze. Mindkét esetben kiderült, hogy a két ásvány eltérő hőmérsékleten és/vagy eltérő sótartalmú oldatból képződött. Későbbi munkák során több kutató is hasonló eredményre jutott más opak ásványok és a velük egyidősnek vélt, normál fényben átlátszó ásvány fluidumzárvány vizsgálatával (LÜDERS 1996, BAILLY et al. 2000). A Fülöp-szigeteki Lepanto magas szulfidációs fokú Cu-Au ércesedésének enargitján végzett mikrotermometriai vizsgálatokkal az ércesedést létrehozó fluidum áramlási rendszer egészét modellezték (MANCANO & CAMPBELL 1995). Ennek során nemcsak az ércképző folyamatok jellemzőit, hanem a porfíros és az epitermás telepek kapcsolatát is vizsgálták.

RICHARDS & KERRICH (1993) munkája az egyik legelterjedtebb szulfidásvány, a pirit infravörös mikroszkópos fluidumzárvány vizsgálatáról szól. Mivel a pirit számos geológiai környezetben megtalálható, több lelőhelyről származó kristályokon végeztek főként optikai megfigyeléseket. Piritkristályok fluidumzárványain mért

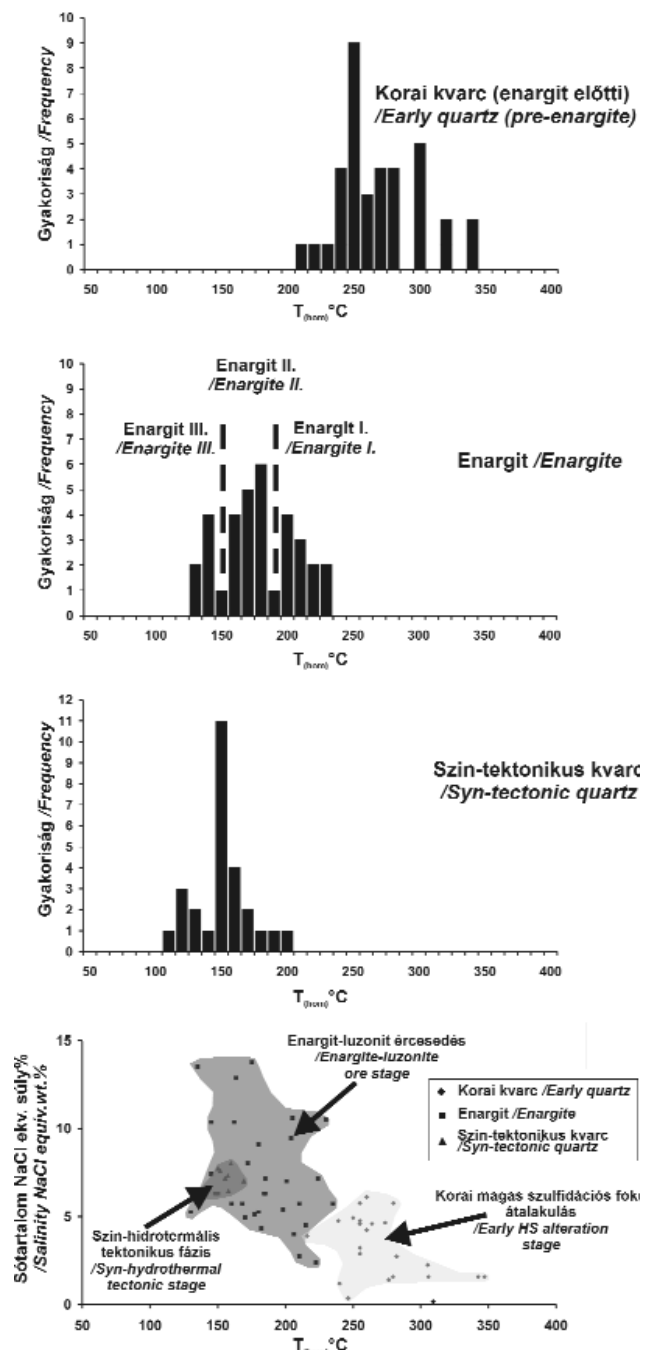
mikrotermometriai adatokat később LÜDERS & ZIEMANN (1999) is közölt. Az előző munkához hasonlóan számos (25) lelőhelyről, különböző geológiai környezetből származó mintákat vizsgáltak. Az ásványtani megfigyeléseken és a fluidumzárványok mikrotermometriai vizsgálatán túl a minták infravörös tartományban tapasztalható átlátszóságával is foglalkoztak. Megfigyeléseik szerint a hidrotermális és metamorf eredetű pirit változatos, míg a diagenetikus pirit általában nagyon kicsi átlátszóságú infravörös fényben, bár az utóbbi minták esetében is akadt olyan, melyekben jó átlátszóságot tapasztaltak. Erre a változosságra próbáltak a fent említett szerzők magyarázatot találni a minták elektronmikroszkópos vizsgálatával, de nem sikerült összefüggést találniuk a minták nyomelemtartalma és infravörös transzmittanciája között. Az előzőkhez hasonló munkát jelentettek meg LINDAAS (2002) is, melyben 64 különböző lelőhelyről származó piritkristályon végeztek infravörös mikroszkópos megfigyeléseket és mikrotermometriai vizsgálatokat.

A vizsgálandó példányok számának növekedése, valamint a minták kiszámíthatatlan infravörös transzmittanciája miatt szükségessé vált egy olyan vizsgálati módszer kidolgozása, melynek segítségével gyorsan és könnyen kiválogathatók az infravörös mikroszkópiára alkalmas ásványok. Az első ilyen kutatások a Fourier-transzformációs infravörös (FT-IR) spektroszkópián alapultak. E vizsgálatok során a kristályok transzmissziós spektrumát mérték a közeli infravörös tartományban (LÜDERS & ZIEMANN 1999, LINDAAS et al. 2002). A mérések során kiderült, hogy a kapott spektrum az abszorpciós határról (amit a tiltott sáv energia határoz meg), és az infravörös transzmittancia hullámhossz függvényében történő változásairól is információval szolgál. A pirit esetében megállapították, hogy több mint 20%-os infravörös átteresztő képesség (0,8–2,5 μm hullámhossz tartományban) szükséges a fluidumzárványok megfigyeléséhez (LÜDERS & ZIEMANN 1999). A FT-IR spektroszkópia kombinálható egy hűthető-fűthető tárgyasztallal, így mérhető a transzmittancia változása a hőmérséklet függvényében is (LÜDERS & ZIEMANN 1999).

Az utóbbi években az infravörös mikroszkópos vizsgálatokat több más vizsgálati módszerrel kombinálták (RIOS et al. 2006, KOUZMANOV et al. 2010), valamint részletesebben is foglalkoztak az infravörös mikrotermometria mérési hibáival is (MORITZ 2006).

Magyarországról származó opak ásvány mintákon elsőként a recski Lahóca-hegyről származó enargiton és a Mátraszentimre környéki Szent-Imre-telérből származó antimoniton (VÁGÓ 2007, MOLNÁR et al. 2008, TAKÁCS 2009) végeztek fluidumzárvány vizsgálatokat. Az antimonit esetében csak mikroszkópos megfigyelések történtek a kristályok változó átlátszósága és a zárványok jellemzően „lefüződött” (befogódás után módosult) alakja miatt. Ezzel szemben a recski enargit már alkalmas volt részletes mikrotermometriai vizsgálatokra is. Infravörös fényben a recski enargit sok esetben zónásságot mutat, melyet a hagyományos reflexiós mikroszkópban nem lehet megfigyelni,

valamint egyes kristályoknak jelentős mértékben változik az infravörös transzmittanciája a hőmérséklet emelkedés hatására (VÁGÓ, 2007). Ezekben az enargitkristályokban található elsődleges fluidumzárványok homogenizációs hőmérsékletét, valamint sótartalmát MOLNÁR et al. (2008) munkájukban összehasonlították Lahócáról származó, különféle generációjú kvarckristályok hasonló adataival (1. ábra). A kapott diagramról egy hőmérsékletcsökkenéssel párosuló sótartalom-növekedés olvasható le, aholis az enargitból származó értékek a korai kiválású kvarc- és a



1. ábra. Lahócai ércesedésből származó enargit- és kvarckristályok fluidumzárvány eredményeinek összehasonlítása (MOLNÁR et al. 2008 nyomán)

Figure 1. Comparison of enargite- and quartz-hosted fluid inclusion results from the Lahóca epithermal ore deposit (modified after MOLNÁR et al. 2008)

késői kiválású kvarckristályokból származó értékek között helyezkednek el. Hasonlóan tehát a fent említett korábbi munkákhoz, ebben az esetben is kiderült hogy opak ásványok mikrotermometriai vizsgálatával fontos adatokhoz jutunk egy vizsgált földtani folyamat oldatáramlási rendszerére vonatkozóan.

Az elmúlt közel 30 évben infravörös mikroszkópos vizsgálatnak alávetett opak ásványokat és lelőhelyeiket, továbbá a hozzávetőleges infravörös transzmittancia értékeket a szakirodalmi adatok alapján a Függelékben foglaltuk össze.

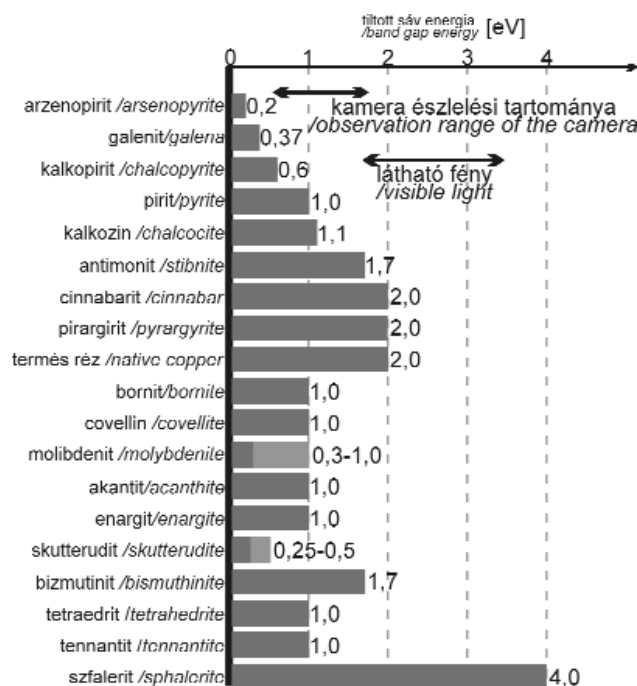
Elméleti háttér

A szulfidok és hozzájuk kapcsolódó opak ásványok kristályszerkezetében a kémiai kötések összetettebbek, mint például a szilikátok vagy az oxidok szerkezetének kovalens kötései. Mivel az átmeneti fémek (Fe, Zn, Cu stb.) és a kén elektronegativitása között kicsi a különbség, ezért a fém és a kénatomok közötti kötések bizonyos mértékig (10–20%) fémes jellegűek (NESSE 2000). Ennek köszönhetően sok szulfidásvány rendelkezik jelentős fémes tulajdonsággal. Azt hogy a szulfidokban a kötések fémesebb, vagy kovalensebb jellegűek az elektronok által elfoglalt pályák (vegyértéksáv) energia szintjeitől, valamint a még szabadon álló pályák (vezetési sáv) energiaszintjeitől függnek. Ha ezen energiaszintek között kicsi a különbség (0–3,5 eV), akkor félvezetőkről beszélhetünk. A szulfidok esetében ez legtöbbször így van (2. ábra), így többnyire félvezetőknak tekinthetők (CAMPBELL et al. 1984, RICHARDS & KERRICH 1993, NESSE 2000).

A félvezetők elektronszerkezetét a legjobban az ún. sávmodell szemlélteti (3. ábra). A sávokat úgy foghatjuk fel, mint azon energiaszintek gyűjteményét, melyeken az elektronok elhelyezkednek. A Pauli-elv alapján azonos energiaszinten több elektron nem tartózkodhat, ezért egy-egy sávot szorosan elosztott energiaszintek alkotnak. A félvezetők elektromos tulajdonságait a legmagasabb részlegesen betöltött (vegyértéksáv) és a legalacsonyabb részlegesen üres sáv (vezetési sáv) határozzák meg (SHUEY 1975). Ezeket a sávokat az úgynevezett tiltott sáv választja el. A tiltott sáv energiája megegyezik azzal a minimum energiával, amely ahhoz szükséges, hogy az elektron a vegyértéksávból a vezetési sávba kerüljön (ZEGHBROECK 2007).

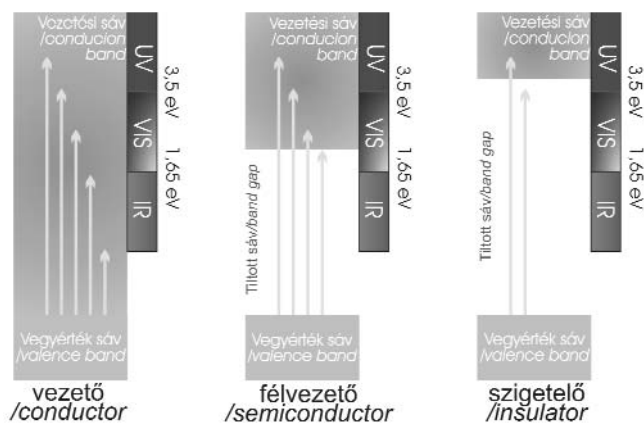
Az emberi szem számára látható fény (400–700 nm) 1,7–3,0 eV közötti energiával rendelkezik, így számunka csak azok az ásványok tűnnek átlátszóknak áteső fénymenetű mikroszkópban, amelyeknek a tiltott sáv energiája nagyobb, mint 3,0 eV (SHUEY 1975). A fény infravörös tartományának (780 nm – 1000 μ m) azonban kisebb az energiája (1,65 eV vagy kisebb), így az nem abszorbeálódik a kisebb tiltott sáv energiával rendelkező szulfidokban és egyes oxidokban. Ezáltal ezek az ásványok „átlátszóvá” válnak a fény infravörös tartományában.

Hőmérséklet növekedés hatására a félvezetők tiltott sáv szélessége csökken, így csökken az infravörös



2. ábra. Egyes szulfid ásványok tiltott sáv energiája. A két fekete vonal jelöli a normál fény energiatarományát, valamint azt az energia tartományt, amelyhez tartozó hullámhosszokon érzékel a kamera (SHUEY 1975 és CAMPBELL et al. 1984 nyomán)

Figure 2. Band gap energies of some sulphide minerals. The black lines show the range of the visible light and the observation range of the camera (after SHUEY 1975 and CAMPBELL et al. 1984)



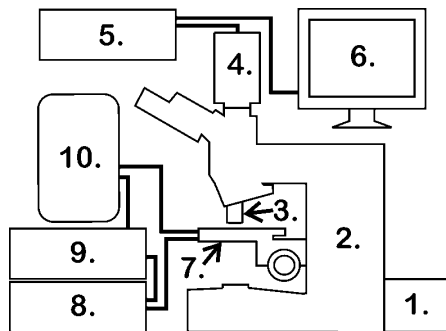
3. ábra. A sávmodell egyszerűsített ábrája, ami szemlélteti a vezető, félvezető és szigetelő tulajdonságú anyagok tiltott sáv energiáját (ZEGHBROECK 2007 és VÁGÓ 2007 alapján)

Figure 3. Simplified energy band gap diagram of conductor, semiconductor and insulator materials (after ZEGHBROECK 2007 and VÁGÓ 2007)

fényben tapasztalt az átlátszóság is. Ez a jelenség annak a következménye, hogy a növekvő hőenergia hatására megnő az atomok vibrációja. Az atomtávolságok növekedésével csökken az elektronok átlagos potenciálja, ami a tiltott sáv szélességet redukálja. Az atomok közötti térmechanikai modulációja a sáv szélességet is módosítja, kompresszióra növeli, húzásra csökkenti azt (ZEGHBROECK 2007).

Műszeres háttér

A mikrotermometriai vizsgálatokhoz alapvető első lépés az opak ásvány „átlátszóvá” tétele. Ehhez szükség van egy infravörös tartományban érzékelő kamerára, egy megfelelő fényforrásra, speciális infravörös fényt áteresztő objektívekre és egy olyan mikroszkópra, melynek fénymenetében nem található különböző fényzűrők (4. ábra). Az ELTE Ásványtani Tanszékén felállított infravörös rendszerben egy Hamamatsu C2400-03-as típusú CCD kamera állítja elő a képet, melynek maximális észlelési hullámhossz tartománya 0,6–2,1 μm . A kamerához tartozik egy vezérlő egység, amin keresztül szabályozni lehet a kamera érzékenységét, valamint különböző elektronikus szűrő és erősítő eljárásokkal



4. ábra. Az infravörös mikroszkópiához és mikrotermometriához szükséges műszerek

1 – fényforrás; 2 – fényzűrők nélküli mikroszkóp; 3 – speciális objektívek; 4 – infravörös kamera; 5 – kamera vezérlő egysége; 6 – monitor; 7 – hűthető-fűthető tárgyasztal; 8 – tárgyasztal vezérlő egysége; 9 – folyékony nitrogén pumpa; 10 – folyékony nitrogén tartály

Figure 4. The requisite instruments for the infrared microscopy and microthermometry

1 – light source; 2 – microscope without any filter lens; 3 – objectives to IR light; 4 – IR sensitive camera; 5 – control panel of the camera; 6 – monitor; 7 – heating-freezing stage; 8 – control panel of the heating-freezing stage; 9 – liquid nitrogen pump; 10 – liquid nitrogen tank

javítható a megjelenített kép. Ezeknek a funkcióknak köszönhetően az adott minta tulajdonságaihoz igazodva állíthatjuk be a mikroszkóp fényintenzitását az észleléshez szükséges jó minőségű kép előállítására érdekében. Ahhoz hogy a kamerába eljusson a megfelelő hullámhosszú fény, az infravörös fény átengedésére optimalizált, hosszú gyújtótávolságú objektívek is szükség van (Olympus MIRPlan típusú, 5 \times , 10 \times , 50 \times és 100 \times nagyítású objektívek). A fényforrás tekintetében, a mikroszkópokba általában gyárilag beszerelt halogénizzók a célnak megfelelnek.

A mikrotermometriai vizsgálatok elvégzéséhez bizonyos esetekben (a vizsgálandó minta infravörös transzmittanciájától függően) a hagyományos hűthető-fűthető tárgyasztalok is megfelelnek, de az ezekben található optikai egységek a kicsi hullámhossztartományban, valamint az infravörös tartomány esetében kevesebb százalékban engedik át, sőt esetenként elnyelik a fényt. A már említett rend-

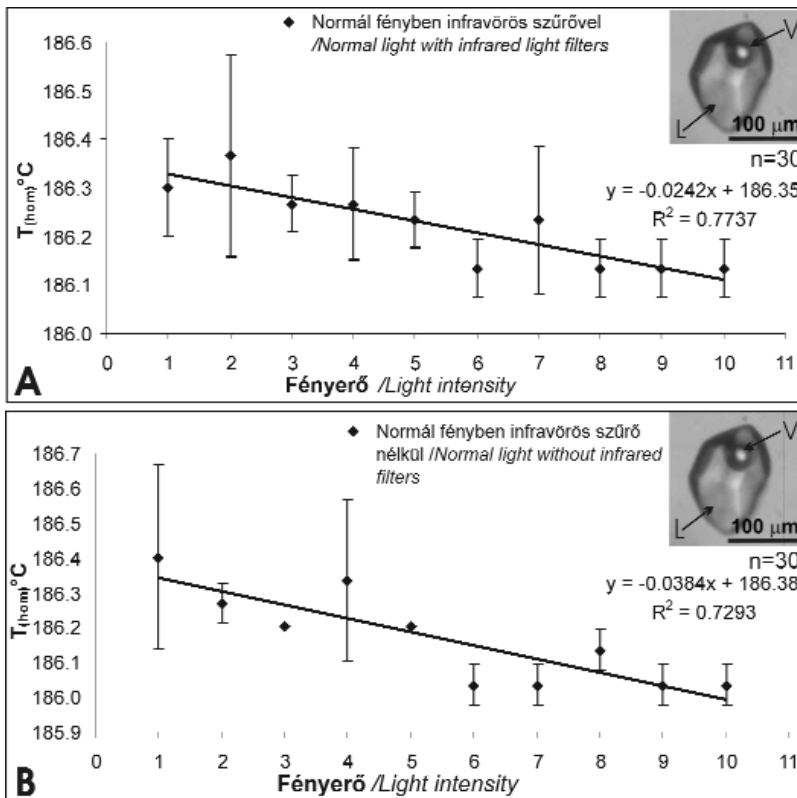
szer esetén, az infravörös mikrotermometriai vizsgálatokat Linkam FTIR-600 típusú hűthető-fűthető tárgyasztal (szintetikus H₂O és CO₂ tartalmú zárványokon végzett kalibrációs mérések alapján a mérési tartomány: –196 – +600 °C; mérések reprodukálhatósága $\pm 0,1$ °C) segítségével végeztük. E tárgyasztalnak nagy előnye, hogy kifejezetten infravörös mikroszkópiához és spektroszkópiához tervezték, ezért többféle hullámhossz tartományt átengedő „ablak” rendelhető hozzá. Jelen esetben a tárgyasztalba cink-szelenid (hullámhossztartomány: 0,5–20 μm) és zaffir (hullámhossztartomány: 0,15–5 μm) ablakok szerelhetők, melyek fényáteresztő képessége a közeli infravörös tartományban is optimális.

Infravörös mikrotermometria

Az infravörös mikrotermometria a mérés során alkalmazott hullámhosszú fényt, az azt érzéklni képes kamerát, és a vizsgált mintákat leszámítva semmiben sem különbözik a hagyományos fluidumzárvány mikrotermometriától, eltekintve attól a tényről, hogy az infravörös sugárzás hatására a fluidumzárványon belül jelentős „üvegházhatás” léphet fel, főként ha a zárvány gáztartalmú (CO₂, CH₄, H₂S stb). Ennek kiküszöbölésére az átlátszó ásványok normál fénymenetű vizsgálatokhoz az infravörös sugárzást szűrők segítségével kiszűrjük. Infravörös mikroszkópiánál természetesen e szűrőket nem alkalmazhatjuk.

Ezt az „üvegházhatást” tulajdonképpen az a termálisenergia-többlet okozza, amit az infravörös fény közöl az általa átvilágított fluidum zárvánnyal. Ezt a hőmérséklet-növekedést azonban a hűthető-fűthető tárgyasztal nem képes érzéklni. Ez a különbség a valós és a mért értékek között később az adatok értékelésekor a homogenizációs hőmérséklet alulbecsléséhez, míg a sótartalom túlbecsléséhez vezethet. Ennek a jelenségnek a fontosságát elsőként MORITZ (2006) elemezte. A nevezett munka összevetette a különböző fényintenzitások mellett enargitban mért homogenizációs és jégolvadási értékeket, és bemutatta azt, hogy a legnagyobb eltérést a jégolvadási hőmérsékletek esetén várhatjuk. MORITZ (2006) szerint tehát minél nagyobb fényintenzitás mellett végezzük a méréseket, annál kisebb homogenizációs és jégolvadási hőmérsékletet, illetve ebből aztán annál nagyobb sótartalomértékeket számolhatunk.

Más szakirodalmakhoz hasonlóan (CAMPBELL & ROBINSON-COOK 1987; BAILLY et al. 2000) ezt a jelenséget normál fényben is átlátszó ásvány zárványainak normál és infravörös fényben mért értékeinek összehasonlításával vizsgáltuk. Erre azért volt szükség, mert MORITZ (2006) nem ugyanazt a berendezést használta a mérések során, mint amely rendszer az ELTE TTK Ásványtani Tanszékének fluidumzárvány laboratóriumában beüzemeltünk, ezért nem alkalmazhatóak az általuk kapott korrekciós értékek. A mérési sorozathoz egy olyan ásványban csapdázódott fluidumzárványra van szükség, amelyikben alacsony fényintenzitás mellett is jól észlelhetőek a fázisátalakulások, és



5. ábra. Kvarckristály fluidumzárványában, normál fényben infravörös szűrővel (A) és szűrő nélkül (B) mért homogenizációs hőmérsékletek

A vonalak az adatok közötti trendet szemléltetik

Figure 5. Homogenization temperatures of quartz-hosted fluid inclusion in normal light with infrared filters (A) and without filters (B)

The two lines show the trend among the measured data

amelyik ásvány nem rendelkezik jó hasadással, ezért elég ellenálló ahhoz, hogy a zárványt többször is lehessen melegíteni és hűteni, anélkül hogy a zárvány dekretitálódna. Ezeket a kritériumokat szem előtt tartva esett a választás a kvarckristály fluidumzárványaira. A mikrotermometriai méréseket Gyöngyösorszi egyik kvarcteléréből származó kvarckristály kétfázisú (folyadék+gőz) fluidumzárványán végeztük el. A kapott homogenizációs értékek (5. ábra, I. táblázat) alapján elmondható, hogy a normál fényben mért értékekhez ($T_{\text{hom}} = 186,1\text{--}186,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasonló homogenizációs hőmérséklet tartományt kapunk ($T_{\text{hom}} = 186,0\text{--}186,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) az infravörös fényben történő mérések során. Nagyon kis mértékben azonban, megfigyelhető a fény-

I. táblázat. Mérési eredmények – kvarc

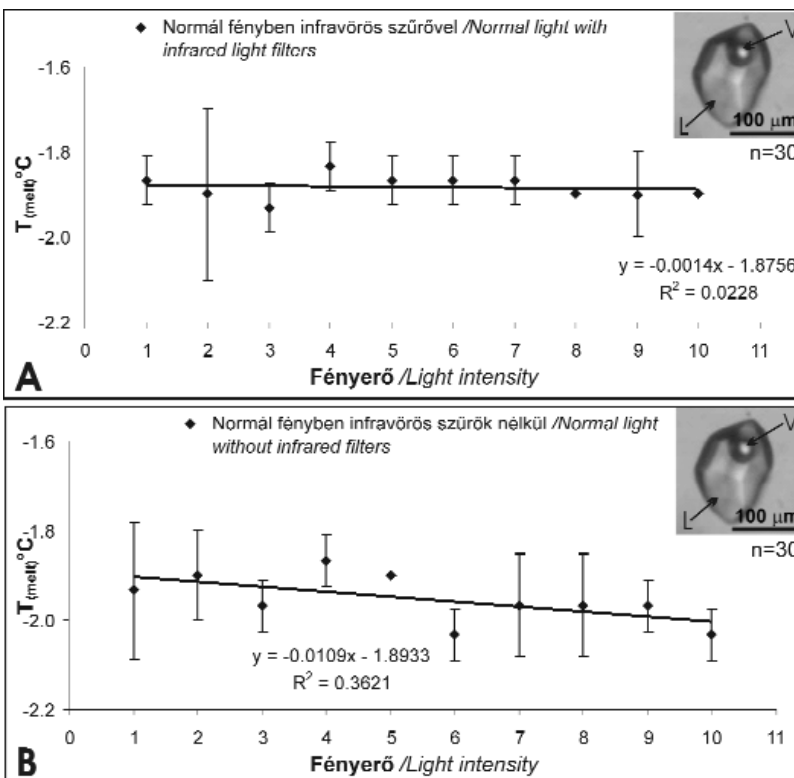
Table I. Measured data – quartz

Fényerő / Light intensity	Normál fényben infravörös szűrővel / normal light with infrared filter						Normál fényben infravörös szűrő nélkül / normal light without infrared filter					
	$T_{\text{(hom)}}$	$T_{\text{(hom)}}$ átlag /average	$T_{\text{(hom)}}$ szórás /deviation	$T_{\text{(met)}}$	$T_{\text{(met)}}$ átlag /average	$T_{\text{(met)}}$ szórás /deviation	$T_{\text{(hom)}}$	$T_{\text{(hom)}}$ átlag /average	$T_{\text{(hom)}}$ szórás /deviation	$T_{\text{(met)}}$	$T_{\text{(met)}}$ átlag /average	$T_{\text{(met)}}$ szórás /deviation
1	186.2	186.30	0.10	-1.9	-1.87	0.06	186.3	186.40	0.26	-2.1	-1.93	0.15
	186.4			186.2			-1.8					
	186.3			186.7			-1.9					
2	186.3	186.37	0.21	-1.9	-1.90	0.20	186.3	186.27	0.06	-2.0	-1.90	0.10
	186.2			186.2			-1.8					
	186.6			186.3			-1.8					
3	186.3	186.27	0.06	-2.0	-1.93	0.06	186.2	186.20	0.00	-2.0	-1.97	0.06
	186.2			186.2			-1.9					
	186.7			186.2			-2.0					
4	186.2	186.27	0.12	-1.8	-1.83	0.06	186.2	186.33	0.23	-1.9	-1.87	0.06
	186.4			186.6			-1.8					
	186.2			186.2			-1.9					
5	186.3	186.23	0.06	-1.9	-1.87	0.06	186.2	186.20	0.00	-1.9	-1.90	0.00
	186.2			186.2			-1.9					
	186.7			186.2			-2.0					
6	186.1	186.13	0.06	-1.9	-1.87	0.06	186.1	186.03	0.06	-2.0	-2.03	0.06
	186.2			186.0			-2.1					
	186.1			186.0			2.0					
7	186.2	186.23	0.15	1.9	-1.87	0.06	186.1	186.03	0.06	-1.9	-1.97	0.12
	186.1			186.0			-2.1					
	186.4			186.0			1.9					
8	186.1	186.13	0.06	-1.9	-1.90	0.00	186.2	186.13	0.06	-1.9	-1.97	0.12
	186.2			186.1			-1.9					
	186.1			186.1			2.1					
9	186.1	186.13	0.06	-2.0	-1.90	0.10	186.0	186.03	0.06	-2.0	-1.97	0.06
	186.1			186.1			-1.9					
	186.2			186.0			2.0					
10	186.1	186.13	0.06	-1.9	-1.90	0.00	186.0	186.03	0.06	-2.0	-2.03	0.06
	186.1			186.1			-2.0					
	186.1			186.1			-2.0					

intenzitás növekedésével a homogenizációs értékek csökkenése az infravörös fény használatával. Az eddigieket alapul véve tehát az infravörös fényben mért értékek közül a legnagyobb homogenizációs hőmérsékletet kell valóságnak tekinteni. Azonban a mért értékek között csekély eltérés tapasztalható csupán, amely nem befolyásolja a földtani értelmezést, így esetünkben a homogenizációs értékek korrekciójától eltekinthetünk.

A végső jégolvadási hőmérsékletek vizsgálata esetén már nagyobb eltérés tapasztalható (6. ábra, I. táblázat). Normál fényben a különböző fényintenzitások mellett, viszonylag egyenletes eloszlásban, $-2,1$ – $-1,7$ °C közötti értékek szerepelnek. Ezzel szemben az infravörös fény használata esetén már tapasztalni lehetett a fényintenzitás

letét, különböző fényintenzitások (a mikroszkóp fényerősség szabályozójának különböző beosztásai) mellett vizsgáltuk. Ehhez a mérési sorozathoz egy olyan zárványt kellett találni az enargitkristályban (I. tábla A–G), amely akár a legkisebb infravörös fényintenzitás mellett is kellően átlátszó és a zárvány teljes terjedelmében átlátható, tehát nincsenek benne sötét részek. Ezen kritériumoknak leginkább megfelelő zárványt a recski Lahóca enargitos ércesedésének VIII. tömzséből származó egyik mintájában találtunk. Ez a minta SZTRÓKAY Kálmán lahócai gyűjteményéből származik, melynek vizsgálatával SZTRÓKAY (1940, 1952) leírta a lahócai ércesedés ércásvány-paragenezisét, valamint jelentős genetikai megfigyeléseket tett. E tanulmányok óta nem is készült hasonló, a tömzsöket átfogó vizsgálat. A minta enargitkristályaiból kapott homogenizációs értékek (7. ábra, A; II. táblázat) az előző feltételezés mellett szólnak: a kvarckristályban mért értékekhez képest itt már nagyobb eltérés figyelhető meg a kis és nagy fényintenzitásokon mért értékek között. Nagyobb fényintenzitás mellett az enargitban akár 6 °C-al is kisebb homogenizációs hőmérsékletet mérhetünk a kisebb fényintenzitáson mért értékekhez képest. Még mielőtt azonban elvetnénk azt az előző gondolatot, hogy nem szükséges a mért adatok korrekciója, fontos megismerni a homogenizációs mérések néhány alapvető jelenségét. A hőmérséklet növekedés hatására eltérő mértékben csökken a vizsgált szemcse és/vagy zárvány átláthatósága, ami megnehezítheti a pontos észlelést. A másik megfigyelést befolyásoló tényező a gőzfázis mérete közvetlenül a homogenizáció előtt. Ebben a zárványban, sok más zárványhoz hasonlóan, a buborék mérete jelentősen lecsökkent már jóval a homogenizációs hőmérséklet elérése előtt. Ez azt jelenti, hogy a gőzfázis egy apró fekete ponttá zsugorodik, ami gyors hőmozgást végez a zárványban, amelynek a megszűnésével észlelhető a homogenizációs hőmérséklet elérése. A gőzfázis mérete azonban a homogenizáció előtt már az infravörös fényben tapasztalható felbontóképesség alatt van. Ezért a homogenizáció



6. ábra. Kvarckristály fluidumzárványában, normál fényben infravörös szűrővel (A) és szűrő nélkül (B) mért jégolvadási hőmérsékletek

A vonalak az adatok közötti trendet szemléltetik

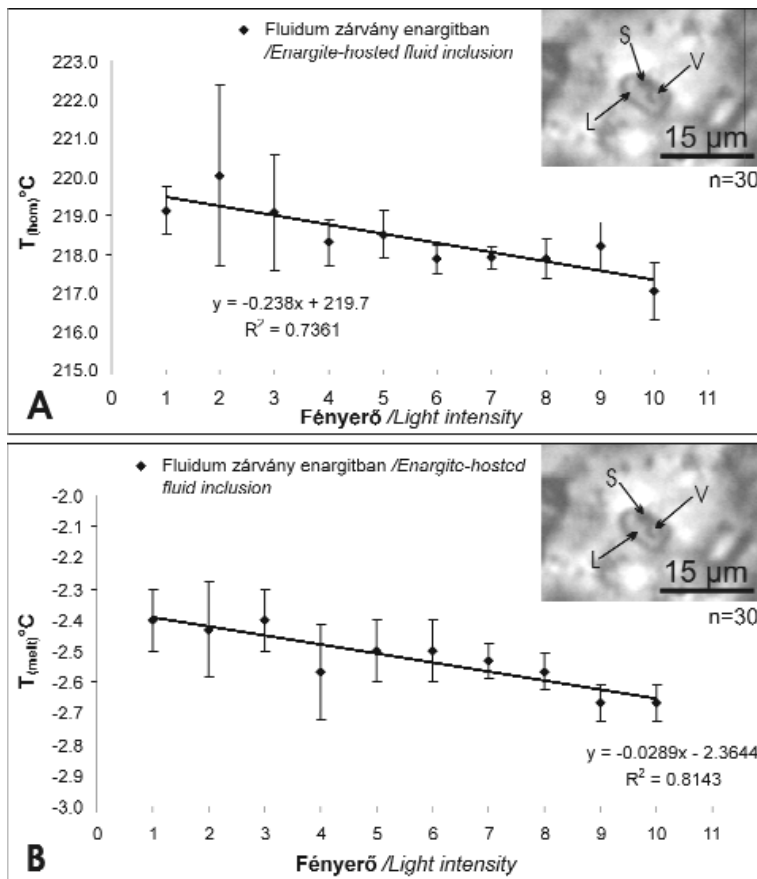
Figure 6. Final ice melting temperatures of quartz-hosted fluid inclusion in normal light with infrared filters (A) and without filters (B)

The two lines shows the trend among the measured data

növelésével a kisebb jégolvadási hőmérsékletértékek határozottabb megjelenését. Mivel a különbség még mindig nem mondható földtani értelemben lényegesnek, ezért ezen adatok alapján nem szükséges a mérési adatok korrekciója.

Az enargit a már tárgyalt fémessége miatt jobb hővezető mint a kvarc, így elképzelhető hogy az enargit esetében már mérhetnénk földtani értelmezés szempontjából is jelentős eltérést mind a homogenizációs, mind a jégolvadási hőmérsékletekben. Ennek ellenőrzésére végeztünk egy méréssorozatot, amely során egy recski enargitmintában található zárvány homogenizációs és jégolvadási hőmérsék-

letét, különböző fényintenzitások (a mikroszkóp fényerősség szabályozójának különböző beosztásai) mellett vizsgáltuk. Ehhez a mérési sorozathoz egy olyan zárványt kellett találni az enargitkristályban (I. tábla A–G), amely akár a legkisebb infravörös fényintenzitás mellett is kellően átlátszó és a zárvány teljes terjedelmében átlátható, tehát nincsenek benne sötét részek. Ezen kritériumoknak leginkább megfelelő zárványt a recski Lahóca enargitos ércesedésének VIII. tömzséből származó egyik mintájában találtunk. Ez a minta SZTRÓKAY Kálmán lahócai gyűjteményéből származik, melynek vizsgálatával SZTRÓKAY (1940, 1952) leírta a lahócai ércesedés ércásvány-paragenezisét, valamint jelentős genetikai megfigyeléseket tett. E tanulmányok óta nem is készült hasonló, a tömzsöket átfogó vizsgálat. A minta enargitkristályaiból kapott homogenizációs értékek (7. ábra, A; II. táblázat) az előző feltételezés mellett szólnak: a kvarckristályban mért értékekhez képest itt már nagyobb eltérés figyelhető meg a kis és nagy fényintenzitásokon mért értékek között. Nagyobb fényintenzitás mellett az enargitban akár 6 °C-al is kisebb homogenizációs hőmérsékletet mérhetünk a kisebb fényintenzitáson mért értékekhez képest. Még mielőtt azonban elvetnénk azt az előző gondolatot, hogy nem szükséges a mért adatok korrekciója, fontos megismerni a homogenizációs mérések néhány alapvető jelenségét. A hőmérséklet növekedés hatására eltérő mértékben csökken a vizsgált szemcse és/vagy zárvány átláthatósága, ami megnehezítheti a pontos észlelést. A másik megfigyelést befolyásoló tényező a gőzfázis mérete közvetlenül a homogenizáció előtt. Ebben a zárványban, sok más zárványhoz hasonlóan, a buborék mérete jelentősen lecsökkent már jóval a homogenizációs hőmérséklet elérése előtt. Ez azt jelenti, hogy a gőzfázis egy apró fekete ponttá zsugorodik, ami gyors hőmozgást végez a zárványban, amelynek a megszűnésével észlelhető a homogenizációs hőmérséklet elérése. A gőzfázis mérete azonban a homogenizáció előtt már az infravörös fényben tapasztalható felbontóképesség alatt van. Ezért a homogenizáció megfigyelése nem könnyű feladat, így az enargit zárványában kapott nagyobb eltéréshez ez is hozzájárulhatott. A jégolvadás megfigyelése sokkal egyszerűbb, ugyanis kisebb hőmérsékleten nem csökken a zárvány átláthatósága és a bekövetkező fázisátalakulás is sokkal látványosabb. Ezeknél az értékeknél (7. ábra, B; II. táblázat) már nem figyelhető meg a homogenizációs értékekben megjelent nagyobb eltérés. Nagyobb fényintenzitáson itt is kisebb hőmérsékleteket kaptunk, de a különbség a minimum és maximum értékek tekintetében nem haladja meg az 1 °C-ot, a kvarcban mért értékekhez hasonlóan. Az átlagok tekintetében a nagy



7. ábra. Enargit elsődleges fluidumzárványában mért homogenizációs (A) és végső jégolvadási (B) hőmérsékletek eltérő fényintenzitás mellett

A vonalak az adatok közötti trendet szemléltetik

Figure 7. Homogenization (A) and final ice melting (B) temperatures of enargite-hosted primary fluid inclusion in various light intensity

The two lines shows the trend among the measured data

és a kicsi fényintenzitás mellett tapasztalt jégolvadási hőmérsékletek között mintegy 0,2 °C-os az eltérés, ami a műszer kis hőmérsékleten kalibrált 0,1 °C-os mérési pontosságának a határán van.

Fontos megjegyezni, hogy az IR fényben mért mikrotermometriai adatok fényintenzitás-függése a CO₂-tartalmú zárványokban sokkal erőteljesebb lehet, azonban nem sikerült CO₂-tartalmú zárványt találni a vizsgált enargitban, és ezidáig a szakirodalomban sem említettek ilyen összetételű zárvány előfordulását opak ásványban.

Összességében elmondható tehát, hogy tapasztalataink alapján — a földtani értelmezés szempontjából — az IR mikrotermometria mérési eredményeit általában nem szükséges korrigálni. Azonban ha a vizsgálatok közben a minta sajátosságai megkövetelik, hogy nagy

2. táblázat. Mérési eredmények – enargit

Table 2. Measured data – enargite

Fény Intenzitás	Infravörös fényben /in infrared light					
	$T_{(hom)}$	$T_{(hom)}$ átlag /average	$T_{(hom)}$ szórás /deviation	$T_{(melt)}$	$T_{(melt)}$ átlag /average	$T_{(melt)}$ szórás /deviation
1	219.8	219.10	0.62	-2.5	-2.40	0.10
	218.9			-2.4		
	218.6			-2.3		
2	222.7	220.03	2.34	-2.6	-2.43	0.15
	219.1			-2.4		
	218.3			-2.3		
3	220.8	219.07	1.51	-2.5	-2.40	0.10
	218.4			-2.4		
	218			-2.3		
4	218.9	218.30	0.60	-2.4	-2.57	0.15
	218.3			-2.7		
	217.7			-2.6		
5	219.1	218.50	0.60	-2.4	-2.50	0.10
	217.9			-2.5		
	218.5			-2.6		
6	217.7	217.87	0.38	-2.5	-2.50	0.10
	218.3			-2.4		
	217.6			-2.6		
7	218.2	217.90	0.26	-2.6	-2.53	0.06
	217.7			-2.5		
	217.8			-2.5		
8	218.4	217.87	0.50	-2.6	-2.57	0.06
	217.4			-2.6		
	218.4			-2.7		
9	217.5	218.20	0.62	-2.6	-2.67	0.06
	218.7			-2.7		
	217.3			-2.7		
10	217.6	217.03	0.74	-2.6	-2.67	0.06
	216.2			-2.7		

fényintenzitást használjunk, akkor az adatok értelmezésekor a legnagyobb mért hőmérsékletet kell a valósnak tekinteni. Tapasztalataink tehát általában ellentétesek MORITZ (2006) eredményeivel, aki jelentős korrekciós értékeket állapított meg mind a homogenizációs, mind a végső jégolvadási hőmérsékletek esetében az általa elvégzett hasonló mérés-sorozatok alapján. A magyarázatot erre az ellentétre a két mérésorozat során használt műszerek adhatják meg, ugyanis MORITZ (2006) munkája során más típusú, nem infravörös-mikroszkópiára optimalizált változtatható hőmérsékletű tárgyasztalt (U.S.G.S hűthető-fűthető tárgyasztal) használt.

Következtetések

Az ásványok fluidumzárványainak mikrotermometriai vizsgálata a földtani kutatás számos területén sikeresen alkalmazható módszer. Ezen belül az opak ásványok infravörös mikroszkópiája, valamint fluidumzárvány vizsgálata tovább szélesíti ezt a kört, mivel olyan ásványokból kaphatunk információkat, melyeket eddig nem vizsgálhattunk ezzel a módszerrel. Sok esetben pedig egy terület fejlődéstörténetének olyan részleteit őrzik az opak ásványok fluidumzárványai, melyekre más ásványok vizsgálata alapján nem lehetne következtetni. Ezáltal pontosabban megismerhetjük például az egyes érc képző folyamatokat, a hidrotermális események fizikai-kémiai tulajdonságait (P-T-X) és azok változásait, valamint pontosabban rekonstruálható bármely geológiai környezet fluidum áramlási rendszere.

A mikrotermometriai vizsgálatok során kapott mérési adatok helyes értékeléséhez mindig szükséges az adott összeállítású infravörös rendszerrel kalibrációs méréseket végezni, annak érdekében, hogy korrigálható legyen az infravörös fény által okozott „üvegházhatás”. Az ELTE Ásványtani Tanszékén működő infravörös rendszeren elvégzett mérések alapján kizárható, hogy a fluidum-

zárványokon belül fellépő „üvegházhatás” ebben az esetben jelentősen befolyásolná a mikrotermometriai mérések eredményeinek földtani értelmezését az enargit esetében. Azonban más opak ásványok esetében az adatok földtani értelmezése előtt a jelen cikkben bemutatott kalibrációs mérésorozatoknak megfelelő ellenőrző méréseket kell végezni. A más laboratóriumokban meghatározott jelentős mértékű korrekciók, feltehetően az alkalmazott műszerek eltérő tulajdonságai miatt szükségesek. Az Ásványtani Tanszéken alkalmazott infravörös mikroszkópos és mikrotermometriai rendszer kifejezetten az infravörös fény átengedésére optimalizált hűthető-fűthető tárgyasztallal (Linkam FTIR-600), egy nagy hullámhossz tartomány érzékelésére alkalmas, elektronikus szűrőkkel és erősítővel ellátott infravörös kamerával (Hamamatsu C2400-03) és az infravörös fény átengedésére optimalizált objektívekkel (Olympus MIR Plan 5×, 10×, 50×, 100×) rendelkezik. Ezeknek a műszereknek a segítségével csökkenteni lehet az alkalmazandó infravörös fény intenzitását, így az általa okozott „üvegházhatás” mértéke is csökken.

Az infravörös mikroszkópos és mikrotermometriai vizsgálatok új utat nyithatnak a hidrotermális és fluidum áramlási rendszerek hazai vizsgálatában, melyhez a bemutatott laboratórium megfelelő műszeres háttérrel biztosít.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk VÁGÓ Edinának (Univ. Genéva) mérési eredményei és tapasztalatai megosztásáért, valamint VRATISLAV HURAINAK (Comenius Univ., Bratislava) a hasznos szakmai tanácsaiért. Köszönjük a kézirat lektorainak, SZABÓ Csabának és SCHUBERT Félixnek hasznos megjegyzéseiket és építő jellegű kritikáikat.

A projekt részben az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg, a támogatási szerződés száma TÁMOP 4.2.1./B-09/KMR-2010-0003.

Irodalom — References

- BAILLY, L., BOUCHOT, V., BÉNY, C. & MILÉSI, J.-P. 2000: Fluid inclusion study of stibnite using infrared microscopy: an example from the Brouzils Antimony Deposit (Vendée, Armorican Massif, France). — *Economic Geology* **95**, 221–226.
- BROWN, P. E. 1989: Flincor: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. — *American Mineralogist* **74**, 1390–1393.
- CAMPBELL, A. R. & ROBINSON-COOK, S. 1987: Infrared fluid inclusion microthermometry on coexisting wolframite and quartz. — *Economic Geology* **82**, 1640–1645.
- CAMPBELL, A. R., HACKBARTH, C. J., PLUMLEE, G. S. & PETERSEN, U. 1984: Internal features of ore minerals seen with the infrared microscope. — *Economic Geology* **79**, 1387–1392.
- KOUZMANOV, K., PETTKE, T. & HEINRICH, C. A. 2010: Direct analysis of ore-precipitating fluids: Combined IR microscopy and LA-ICP-MS study of fluid inclusions in opaque ore minerals. — *Economic Geology* **105**, 351–373.
- LECOMTE, J. 1928: Le spectre infra-rouge. — *Recueil des conférences-rapports de documentaton sur la physique, Paris, Blanchard*.
- LINDAAS, S. E., KULIS, J. & CAMPBELL, A. R. 2002: Near-infrared observation and microthermometry of pyrite-hosted fluid inclusions. — *Economic Geology* **97**, 603–618.

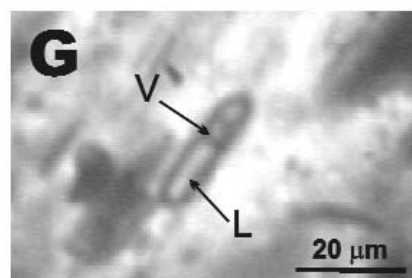
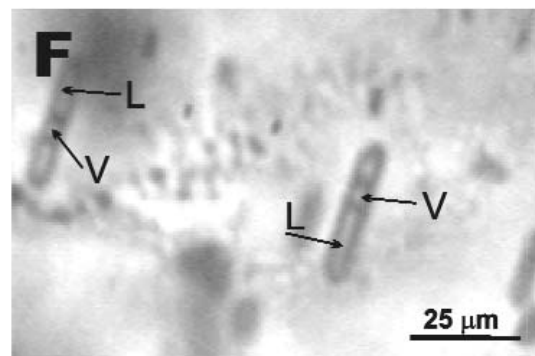
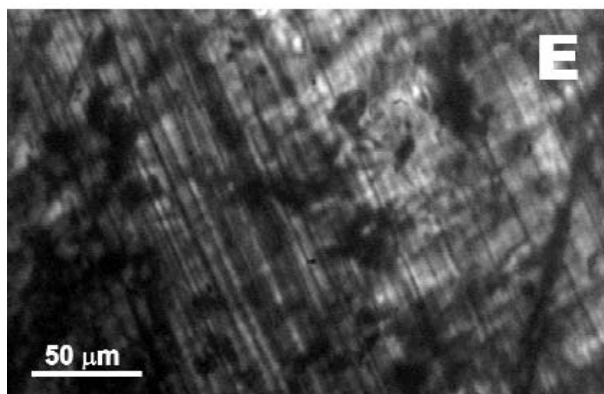
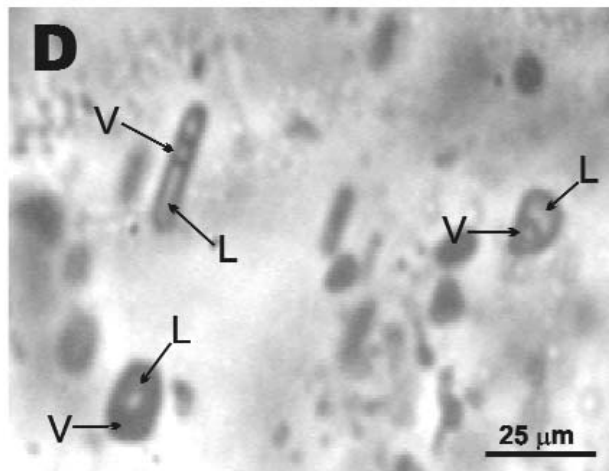
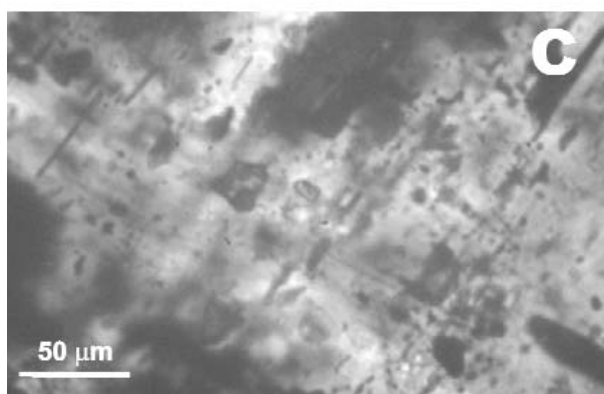
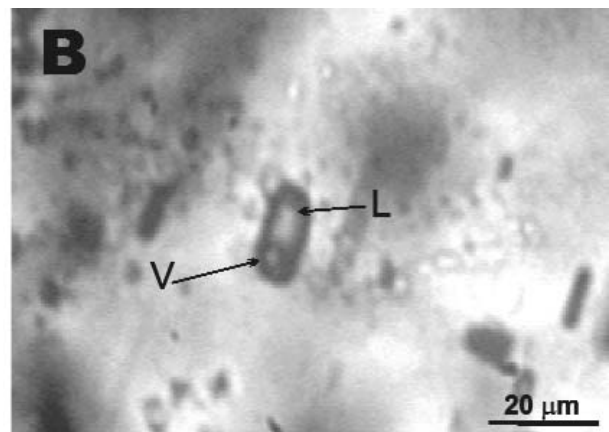
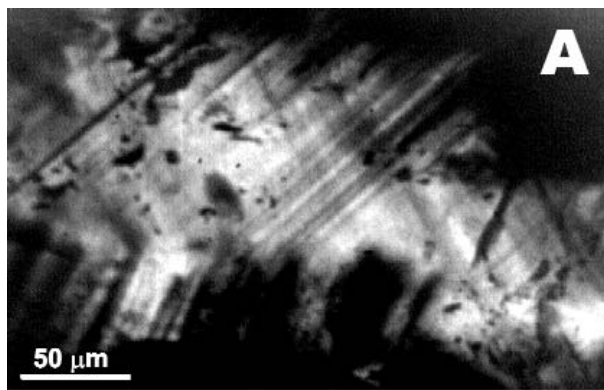
- LÜDERS, V. & ZIEMANN, M. 1999: Possibilities and limits of infrared light microthermometry applied to studies of pyrite-hosted fluid inclusions. — *Chemical Geology* **154**, 169–178.
- LÜDERS, V. 1996: Contribution of infrared microscopy to fluid inclusion studies in some opaque minerals (wolframite, stibnite, bournonite): metallogenic implications. — *Economic Geology* **91**, 1462–1468.
- MANCANO, D. P. & CAMPBELL, A. R. 1995: Microthermometry of enargite-hosted fluid inclusions from the Lepanto, Philippines, high-sulfidation Cu-Au deposit. — *Geochimica Acta* **59/19**, 3909–3916.
- MOLNÁR, F., JUNG, P., KUPI, L., POGÁNY, A., VÁGÓ, E., VIKTORIK, O., PÉCSKAY, Z. & HURAI, V. 2008: Epithermal zones of the porphyry-skarn-epithermal ore complex at Recsk. — *Recsk and Lahóca Geology of the Paleogene Ore Complex, Publications of the University of Miskolc Series A, Mining* **73**, 99–128.
- MORITZ, R. 2006: Fluid salinities obtained by infrared microthermometry of opaque minerals: Implications for ore deposit modeling – A note of caution. — *Journal of Geochemical Exploration* **89**, 284–287.
- NESSE, W. O. 2000: Sulfides and related minerals. — In: *Introduction to Mineralogy*. Chapter 19, Oxford University Press, Oxford, 378–404.
- RICHARDS, J. P. & KERRICH, R. 1993: Observations of zoning and fluid inclusions in pyrite using a transmitted infrared light microscope. — *Economic Geology* **88**, 716–723.
- RIOS, F. H., ALVES, J. V., PÉREZ, C. A., COSTA, É. C., ROSIČRE, C. A., FUZIKAWA, K., CORREIA NEVES, J. M., CHAVES, A. O., PRATES, S. P. & BARRIO, R. E. 2006: Combined investigations of fluid inclusions in opaque ore minerals by NIR/SWIR microscopy and microthermometry and synchrotron radiation X-ray fluorescence. — *Applied Geochemistry* **21**, 813–819.
- ROEDDER, E. 1984: Fluid inclusions. — *Reviews in Mineralogy* **12**, 646 p.
- SHUEY, R. T. 1975: *Semiconducting ore minerals*. — Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 415 p.
- SZTRÓKAY K. 1940: A recski ércek ásványos összetétele és genetikai vizsgálata. — *Mathematikai és Természettudományi Értesítő* **59**, 722–746.
- SZTRÓKAY K. 1952: Újabb vizsgálatok hazai ércásványokon. — *Földtani Közlöny* **82**, 37–43.
- TAKÁCS Á. 2010: Recski Lahóca-hegy fluidáramlási rendszerének rekonstrukciója folyadékzárványok infravörös mikroszkópos vizsgálatával. — *Diplomamunka*, ELTE TTK Ásványtani Tanszék, 94 p.
- TAKÁCS Á. 2009: A mátraszentimrei antimonitos telér ásványtani és genetikai vizsgálata. — In: PAKSY, Z., TÓTH, G. (szerk.): *XXIX. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Fizika, Földtudomány, Matematika Szekció, Összefoglalók*, Nyugat-magyarországi Egyetem Természettudományi-és Műszaki Kar, Szombathely, p. 248.
- VÁGÓ E. 2007: A Lahóca-hegyi magas szulfidizációs fokú epitermális Cu-Au ércesedés jellemvonásai infravörös mikrotermometria alapján. — *Diplomamunka*, ELTE TTK Ásványtani Tanszék, 65 p.
- ZEGHBROECK, B. 2007: Principles of semiconductor devices. — <http://ece.colorado.edu/~bart/book/welcome.htm>.

Kézirat beérkezett: 2010. 11. 26.

I. Tábla — Plate I

- A — Növekedési zónák enargitban infravörös mikroszkópos felvételen (Lahóca-hegy, ÉK-Magyarország). — *Growth zones in enargite under infrared microscope (Lahóca Hill, NE Hungary)*.
- B — Folyadék (L) és gőz (V) fázist tartalmazó fluidumzárvány enargitban, infravörös mikroszkópos felvételen (Lahóca-hegy, ÉK-Magyarország). — *Enargite-hosted two-phase (Liquid+Vapour) fluid inclusion in infrared microscopic image (Lahóca Hill, NE Hungary)*.
- C — Infravörös mikroszkópos felvétel elsődleges (P) és másodlagos (S) fluidumzárvány generációkról enargitban (Lahóca-hegy, ÉK-Magyarország). — *Primary (P) and secondary (S) fluid inclusion generations in enargite under infrared microscope (Lahóca Hill, NE Hungary)*.
- D — Folyadék- (L) és gőz- (V) fázist tartalmazó fluidumzárványok enargitban, infravörös mikroszkópos felvételen (Lahóca-hegy, ÉK-Magyarország). — *Enargite-hosted two-phase (Liquid+Vapour) fluid inclusions under infrared microscope (Lahóca Hill, NE Hungary)*.
- E — Növekedési zónák enargitban infravörös mikroszkópos felvételen (Recsk, Lahóca-hegy). — *Growth zones in enargite under infrared microscope (Lahóca Hill, NE Hungary)*.
- F — Folyadék- (L) és gőz- (V) fázist tartalmazó fluidumzárványok enargitban, infravörös mikroszkópos felvételen (Lahóca-hegy, ÉK-Magyarország). — *Enargite-hosted two-phase (Liquid+Vapour) fluid inclusions under infrared microscope (Lahóca Hill, NE Hungary)*.
- G — Elsődleges, folyadék- és gőzfázist tartalmazó fluidumzárvány enargitban, infravörös mikroszkóp alatt (Lahóca-hegy, ÉK-Magyarország). — *Enargite-hosted two-phase (Liquid+Vapour), primary fluid inclusion under infrared microscope (Lahóca Hill, NE Hungary)*.

I. Tábla — Plate I



Függelék — Enclosure

IR fényben megvizsgált ásványok a szakirodalomban

Studied minerals under IR light in the literature

Ásvány/Mineral	Lelőhely/Locality	IR transzmittancia / IR transmittance	Forrás /Source-reference
Antimonit / <i>Stibnite</i>	Brouzils Sb-ércesedés, Vendee, Armorica-masszívum, Franciaország / <i>France</i>	Közepes / <i>intermediate</i>	BAILLY et al. 2000
	szerzők nem közlik / <i>not reported by the authors</i>	jó / <i>good</i>	CAMPBELL et al. 1984
	Mátraszentimre, Magyarország / <i>Hungary</i>	közepes és foltos <i>intermediate and patchy</i>	TAKÁCS 2009
	Harz-hegység, Németország / <i>Germany</i>	jó / <i>good</i>	LÜDERS 1996
Bournonit / <i>Bournonite</i>	Harz-hegység, Németország / <i>Germany</i>	jó / <i>good</i>	
Cinnabarit / <i>Cinnabar</i>	szerzők nem közlik / <i>not reported by the authors</i>	jó / <i>good</i>	CAMPBELL et al. 1984
Enargit / <i>Enargite</i>	Morococha, Peru	változó / <i>various</i>	
	Lepanto, Fülöp-szigetek / <i>Philippines</i>	közepes / <i>intermediate</i>	MANCANO & CAMPBELL 1995
	Rosia Poieni, Románia / <i>Romania</i>	jó / <i>good</i>	KOUZMANOV et al. 2010
	Lahóca-hg., Recsk, Magyarország / <i>Hungary</i>	jó de foltos <i>good but patchy</i>	VÁGÓ 2007; TAKÁCS 2010
	Chelopech HS epitermális ércesedés, Bulgária / <i>Bulgaria</i>	jó / <i>good</i>	MORITZ 2006
Fe-Columbit <i>Columbite-(Fe)</i>	Ponte da Raiz Pegmatit, Itabira, Minas Gerais, Brazília / <i>Brazil</i>	jó / <i>good</i>	RIOS et al. 2006
Hematit / <i>Hematite</i>	szerzők nem közlik / <i>not reported by the authors</i>	jó / <i>good</i>	CAMPBELL et al. 1984
	Conceição és Timbopeba bányák, Minas Gerais, Brazília / <i>Brazil</i>	kiváló, de 350 °C felett csökken / <i>excellent but decrease above 350 °C</i>	RIOS et al. 2006
Krómit / <i>Chromite</i>	szerzők nem közlik / <i>not reported by the authors</i>	jó / <i>good</i>	
Molibdenit / <i>Molybdenite</i>	szerzők nem közlik / <i>not reported by the authors</i>	jó / <i>good</i>	CAMPBELL et al. 1984
Pirargirit / <i>Pyrargyrite</i>	szerzők nem közlik / <i>not reported by the authors</i>	jó / <i>good</i>	
	Mina Martha Ag-bánya, Deseadói-masszívum, Santa Cruz, D-Patagónia, Argentína / <i>Argentina</i>	kiváló / <i>excellent</i>	RIOS et al. 2006
Pirit / <i>Pyrite</i>	Alden, New York, USA	opak / <i>opaque</i>	LINDAAS et al. 2002
	Amax-bánya, Missouri, USA	közepes / <i>intermediate</i>	
	Ambas Aguas, La Rioja, Spanyolország / <i>Spain</i>	opak / <i>opaque</i>	
	Antire kőfejtő, Missouri, USA	közepes / <i>intermediate</i>	
	Baia Mare, Maramures, Románia / <i>Romania</i>	kiváló, de 200 °C felett csökken / <i>excellent but decrease above 200 °C</i>	
	Barcelona, Spanyolország / <i>Spain</i>	rossz / <i>bad</i>	
	Big Gossan, Indonézia / <i>Indonesia</i>	változó / <i>various</i>	
	Butte, Montana, USA	opak / <i>opaque</i>	
	Cameros medence, Spanyolország / <i>Spain</i>	opak / <i>opaque</i>	
	Cananea, Sonora, Mexikó / <i>Mexico</i>	kiváló / <i>excellent</i>	
	Casino porfir, Yukon térség, Kanada / <i>Canada</i>	kiváló, de foltos <i>excellent but patchy</i>	
	Chino-bánya, Új-Mexikó, USA	jó de foltos <i>good but patchy</i>	
	Chuquicamata, Antofagasta, Chile	közepes / <i>intermediate</i>	
	Climax-bánya, Colorado, USA	jó de foltos <i>good but patchy</i>	
	Commodore-bánya, Colorado, USA	jó de foltos <i>good but patchy</i>	
	Concepción del Oro, Zacatecas, Mexikó / <i>Mexico</i>	kiváló, de foltos <i>excellent but patchy</i>	
	Copper Creek, Arizona, USA	jó / <i>good</i>	
	Cripple Creek, Colorado, USA	rossz / <i>bad</i>	
	Don Carlos-bánya, Hidalgo, Mexikó / <i>Mexico</i>	rossz / <i>bad</i>	
	Dry River South, Queensland, Ausztrália / <i>Australia</i>	kiváló / <i>excellent</i>	
	Ducktown, Tennessee, USA	opak / <i>opaque</i>	
	Endako, British Columbia, Kanada / <i>Canada</i>	opak / <i>opaque</i>	
	Erzurum, É-Anatólia, Törökország / <i>Turkey</i>	kiváló / <i>excellent</i>	
	Garpenberg, Svédország / <i>Sweden</i>	kiváló, de foltos <i>excellent but patchy</i>	

Függelék folytatása – Continuation of enclosure

Ásvány/Mineral	Letőhely/Locality	IR transzmittancia / IR transmittance	Forrás /Source-reference	
Pirit/Pyrite	Gilman, Colorado, USA	kiváló, de foltos <i>excellent but patchy</i>	LINDAAS et al. 2002	
	Golden Hub, Colorado, USA	kiváló / <i>excellent</i>		
	Grant County, Új-Mexikó, USA	kiváló / <i>excellent</i>		
	Grasberg, Indonézia / <i>Indonesia</i>	kiváló / <i>excellent</i>		
	Hemlo, Ontario, Kanada / <i>Canada</i>	opak / <i>opaque</i>		
	Huanzala, Huanaco, Peru	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Jesus María, Peru	közepes / <i>intermediate</i>		
	Kelly-bánya, Új-Mexikó, USA	közepes-jó, de foltos <i>intermediate-good but patchy</i>		
	La Caridad, Sonora, Mexikó / <i>Mexico</i>	jó / <i>good</i>		
	La Rioja, Spanyolország / <i>Spain</i>	opak / <i>opaque</i>		
	Leadville, Colorado, USA	jó / <i>good</i>		
	Liuzhou, Guangxi, Kína / <i>China</i>	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Loma Pesada, Dominikai Köztársaság / <i>Dominican Republic</i>	rossz / <i>bad</i>		
	Lone Tree, Nevada, USA	opak / <i>opaque</i>		
	Magma-bánya, Arizona, USA	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Matagami-tó, Quebec, Kanada / <i>Canada</i>	közepes és foltos <i>intermediate and patchy</i>		
	Mina Mariá, Sonora, Mexikó / <i>Mexico</i>	kiváló / <i>excellent</i>		
	Mina Rosa María, Sonora, Mexikó / <i>Mexico</i>	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Mt. Chalmers, Ausztrália / <i>Australia</i>	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Nacimiento törés, Új-Mexikó, USA	opak / <i>opaque</i>		
	Nadan, Bulgária / <i>Bulgaria</i>	közepes és foltos <i>intermediate and patchy</i>		
	Nanisivik, Kanada / <i>Canada</i>	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Navan, Írország / <i>Ireland</i>	opak / <i>opaque</i>		
	Pecos-bánya, Új-Mexikó, USA	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Pine Point, Kanada / <i>Canada</i>	közepes / <i>intermediate</i>		
	Pinos Altos, Új-Mexikó, USA	opak / <i>opaque</i>		
	Quiruvilca, La Libertad, Peru	jó de foltos <i>good but patchy</i>		
	Rensselaer, Indiana, USA	közepes és foltos <i>intermediate and patchy</i>		
	Río Tinto, Huelva, Spanyolország / <i>Spain</i>	rossz / <i>bad</i>		
	Sandusky, Michigan, USA	opak / <i>opaque</i>		
	Santa Rita, Új-Mexikó, USA	kiváló / <i>excellent</i>		
	Sparta, Illinois, USA	opak / <i>opaque</i>		
	Tembagapura, Irian Jaya, Indonézia / <i>Indonesia</i>	jó / <i>good</i>		
	Tunaberg, Bergslagen, Svédország / <i>Sweden</i>	közepes és foltos <i>intermediate and patchy</i>		
	Wisconsin, USA	változó / <i>various</i>		
	Vlotho és Lehesten, Németország / <i>Germany</i>	rossz / <i>bad</i>		LÜDERS & ZIEMANN 1999
	Minden, Németország / <i>Germany</i>	rossz / <i>bad</i>		
	Valdeparillo, Spanyolország / <i>Spain</i>	rossz / <i>bad</i>		
	Chivar, Kolumbia / <i>Columbia</i>	rossz / <i>bad</i>		
	Wittmannsgereuth, Németország / <i>Germany</i>	rossz / <i>bad</i>		
Teufeburger Wald, Németország / <i>Germany</i>	rossz / <i>bad</i>			
Hüttenberg, Karintia, Ausztria / <i>Austria</i>	rossz / <i>bad</i>			
Ivrea-zóna, Piemont, Olaszország / <i>Italy</i>	jó / <i>good</i>			
Isola Elba, Olaszország / <i>Italy</i>	rossz / <i>bad</i>			
Wiluma-bánya, Ausztrália / <i>Australia</i>	rossz / <i>bad</i>			
Barra do Itapirapua, Brazília / <i>Brazil</i>	jó / <i>good</i>			
Freiberg, Saxony, Németország / <i>Germany</i>	kiváló / <i>excellent</i>			
Schönbrunn, Németország / <i>Germany</i>	közepes-rossz <i>intermediate-bad</i>			
Mazowe-bánya, Zimbabwe	kiváló / <i>excellent</i>			

Függelék folytatása – Continuation of enclosure

Ásvány/Mineral	Lelőhely/Locality	IR transzmittancia / IR transmittance	Forrás /Source-reference
Pirit/Pyrite	Pechtelsgrün, Saxony, Németország / Germany	kiváló /excellent	LÜDERS & ZIEMANN 1999
	Murgul Cu-ércesedés, Törökország / Turkey	kiváló /excellent	
	Lautenthal, Harz-hegység, Németország / Germany	opak /opaque	
	Rammelsberg, Goslar, Németország / Germany	opak /opaque	
	Haselgebirge, Ausztria / Austria	opak /opaque	
	Altenkirchen, Németország / Germany	opak /opaque	
	Siptenfelde, Harz-hegység, Németország / Germany	opak /opaque	
	Navajun, Spanyolország / Spain	opak /opaque	LÜDERS & ZIEMANN 1999; LINDAAS et al. 2002
	Lepanto, Fülöp-szigetek / Philippines	közepes /intermediate	MANCANO & CAMPBELL 1995
	Coahuila, Mexikó / Mexico	kiváló /excellent	RICHARDS & KERRICH 1993
	Porgera, Pápua Új-Guinea / Papua New Guinea	rossz /bad	
	Bingham, Utah, USA	kiváló /excellent	
	Snow Lake, Manitoba, Kanada / Canada	kiváló /excellent	
	Elba, Olaszország / Italy	kiváló, de foltos /excellent but patchy	RICHARDS & KERRICH 1993; LINDAAS et al. 2002
	Rosia Poieni, Románia / Romania	jó /good	KOUZMANOV et al. 2010
Logrono, Spanyolország / Spain	opak /opaque	RICHARDS & KERRICH 1993; LINDAAS et al. 2002	
Polibázit/Polybasite	szerzők nem közlik / not reported by the authors	jó /good	CAMPBELL et al. 1984
Szfalerit/Sphalerite	Coeur d'Alene, Idaho, USA	jó /good	
Tennantit/Tennantite	Casapalca, Peru	jó-közepes /good-intermediate	CAMPBELL et al. 1984; LINDAAS et al. 2002
Tetraedit/Tetrahedrite	Orocopampa, Peru	közepes /intermediate	CAMPBELL et al. 1984
Volframit/Wolframite	San Cristobal, Peru	közepes /intermediate	CAMPBELL et al. 1987
	Panasqueira, Portugália / Portugal	közepes /intermediate	LÜDERS 1996
	Zinnwald, Erzebirge, Németország / Germany	közepes /intermediate	
	Victorio-hegység, Új-Mexikó, USA	jó /good	CAMPBELL et al. 1987
	Pedra Preta W-bánya, Carajás Province, Brazília /Brazil	kiváló /excellent	RIOS et al. 2006

IR transzmittancia mértékének jelentése / IR transmittance	
kiváló excellent	éles kontúrok a zárvány folyadék és gáz fázisa között, 200-300 µm vastag minta / sharp contours between the liquid and gas phases, 200-300 µm thick sample
jó / good	éles kontúrok a zárvány folyadék és gáz fázisa között, 100-150 µm vastag minta / sharp contours between the liquid and gas phases, 100-150 µm thick sample
közepes intermediate	jól észlelhető kontúrok a zárvány folyadék és gáz fázisa között, 50-150 µm vastag minta / appreciable contours between the liquid and gas phases, 50-150 µm thick sample
rossz / bad	néhány foltban látszik csak át mintavastagságtól függetlenül /transparent only in some patch irrespectively of the sample's thickness