

# Fosszilis geoterma rekonstrukciója a Bakony–Balaton-felvidék alatti felsőkőpenyben Tihanyról származó peridotit xenolitok CO<sub>2</sub> fluidumzárvány vizsgálatával<sup>1</sup>

BERKESI MÁRTA<sup>2</sup>, HIDAS KÁROLY<sup>2</sup>, SZABÓ CSABA<sup>2,3</sup>

A Bakony–Balaton-felvidéki Vulkáni Területhez tartozó tihanyi maar vulkán alkáli bazaltos magmája által megmintázott felsőkőpeny peridotitok ortopiroxénjei a szokásosnál nagyobb mennyiségben tartalmaznak CO<sub>2</sub> fluidumzárványokat. A petrográfiai megfigyelés két fluidumzárvány-generáció elkülönítését tette lehetővé, amelyet a mikrotermometria és a Raman-spektroszkópos vizsgálatok is megerősítettek. A termobarometriai számolások és a CO<sub>2</sub>-sűrűségértékek azt sugallják, hogy a Tihany alatti köpenyből származó peridotit xenolitok két, eltérő fizikai és geokémiai paraméterrel leírható köpenyrégióból származnak. A CO<sub>2</sub>-sűrűségértékekből kapott minimum bezáródási nyomás, valamint az ettől független egyensúlyi hőmérsékletértékek szerint a nyolc millió évvel ezelőtti geoterma felsőkőpeny viszonyok között vizsgált szakaszának hőmérséklet-gradiense megközelítőleg 12 °C/km.

M. BERKESI, K. HIDAS, Cs. SZABÓ: Fossile geotherm estimation of spinel peridotite xenoliths from Tihany (Bakony–Balaton Highland Volcanic Field) based on CO<sub>2</sub> fluid inclusions

Orthopyroxenes of upper mantle derived peridotite xenoliths from Tihany maar volcano (Bakony–Balaton Highland Volcanic Field) contain unusually large amount of CO<sub>2</sub> fluid inclusions. Based on our petrographic observations, microthermometry and Raman spectroscopy, two types of fluid generations could be distinguished. The geothermobarometric calculations and CO<sub>2</sub>-density values suggest that the studied xenoliths represent two, physically distinct, shallower and deeper domains in the lithosphere. Minimum trapping pressure estimations of CO<sub>2</sub> fluid inclusions support this idea and provide ~12 °C/km temperature gradient for the upper mantle 8 million years ago.

## 1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedek kísérleti közettani és geokémiai kutatási eredményeinek köszönhetően a kémiai egyensúlyokon alapuló geothermobarometriai számolások a nagyobb nyomáson és hőmérsékleten — így alsókéregben és felsőkőpenyben — kialakult kőzetek egyensúlyi  $P$ – $T$  (nyomás–hőmérséklet) becslését is lehetővé teszik. A spinell lherzolit tartományban egyensúlyba került kőzetekre azonban megbízható barométer nem áll rendelkezésre, az erre a tartományra ismert nyomásbecslő eljárások [pl. MERCIER 1980; O'NEILL 1981; KÖHLER, BREY 1990] jelentős bizonytalanságokkal terheltek.

Mára már jól ismert tény, hogy a kőzetalkotó ásványok kristályosodása során fluidumok (gáz és/vagy folyadék) záródhatnak be kisméretű zárványként, amelyek megőrizhetnek egyes, a kőzetre jellemző fizikai és kémiai paramétereket. A kutatások bizonyították, hogy a felsőkőpeny eredetű xenolitok fluidumjainak összetétele a legtöbb esetben CO<sub>2</sub> [ROEDDER 1984; DE VIVO, LIMA, SCHIRIBANO 1990; TÖRÖK, DE VIVO 1995; SZABÓ, BODNAR 1996; AN-

DERSEN, NEUMANN 2001; FREZZOTTI et al. 2002], ami mellett kis mennyiségben CH<sub>4</sub>-t, CO-t, N<sub>2</sub>-t, H<sub>2</sub>O-t [BERGMAN, DUBESSY 1984; ANDERSEN, NEUMANN 2001], SO<sub>2</sub>-t, H<sub>2</sub>S-t is tartalmazhatnak [BERGMAN, DUBESSY 1984]. A fluidumzárványok vizsgálatával a köpenyben migráló és csapdázódott fluidumok kémiai összetétele, sűrűsége és ezáltal bezáródási nyomása meghatározható, ha az adott kémiai összetételű fluidum  $P$ – $T$  fázisdiagramja ismert. Tekintve, hogy ez a CO<sub>2</sub> esetében adott [pl. ROEDDER 1984; SPAN, WAGNER 1996], lehetőség nyílik a minimális bezáródási nyomás meghatározására a peridotitok — felsőkőpenyből származó kőzetek — egyensúlyi hőmérsékletének ismeretében.

Munkánkban Tihanyból származó felsőkőpeny eredetű spinell peridotit xenolitok fluidumzárványainak petrográfiai, mikrotermometriai és Raman-spektroszkópos vizsgálatát végeztük el. Kutatási eredményeinkkel a Bakony–Balaton felvidéki vulkáni terület (BBFVT) alatti felsőkőpeny közel 8 millió évvel ezelőtti nyomás–hőmérséklet viszonyai megbecsülhetők, amellyel a területre jellemző geoterma egy részének rekonstrukciója is lehetővé vált. A Pannon-medence sekélyebb területeinek nyomás–hőmérséklet kapcsolatát fúróluk-geofizikai és különböző barometriai módszerekkel becsülhetjük, azonban ismert, hogy az eredmények mélység felé történő extrapolálása során ezen módszerek megbízhatósága jelentősen csökken. A felsőkőpenyből származó xenolitok közettani és geokémiai vizsgálatával viszont olyan mélységből nyerünk közvetlen információt többek között a nyomás–hőmérséklet viszonyokról, amely a geofizikai módszerekkel jelenleg csak nagy bizonytalanság mellett becsülhető.

<sup>1</sup> A 2006. március 31-én Balatonkenesén, az Ifjú Szakemberek Ankettáján bemutatott első díjas poszter

<sup>2</sup> Eötvös Loránd Tudományegyetem Közettani és Geokémiai Tanszék, Litoszféra Fluidum Kutató Laboratórium, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c., e-mail: cszabo@elte.hu

<sup>3</sup> Division of Earth Environmental System, College of Natural Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea (Nem szerkesztői elírás: a koreai város nevét latin betűkkel hol „b”-vel, hol „p”-vel írják még a koreai honlapokon is. — T. L.)

## 2. Földtani háttér

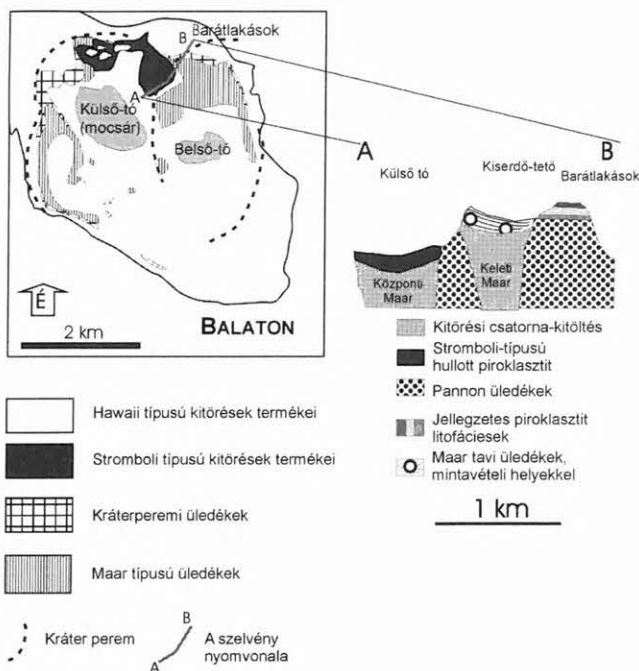
A Pannon-medence kialakulása az alpi hegységképződés késői fázisához, az Apuliai és Európai lemezek konvergenciájához kötődik [HORVÁTH 1993; CSONTOS 1995; FODOR et al. 1999]. A kora miocéntől késő miocénig tartó, a szubdukciós hátragördülés („rollback”) hatására végbe menő medenceképződési folyamat során a térség litoszférája (kéreg és litoszférikus köpeny nagyjából egyenlő mértékben) nagymértékű kivékonyodást szenvedett, amelynek fő fázisa a bádenire tehető [POSGAY et al. 1995; HUISMANS, PODLADCHIKOV, CLOETINGH 2001]. Az asztenoszféra anómáisan sekély pozícióját és szerepét a Pannon-medence képződésében már korábbi geofizikai tanulmányok is feltelezték [pl. STEGENA, GÉCZY, HORVÁTH 1975]. A régió alatti litoszféra szokatlanul vékony, átlagosan körülbelül 60 km [HORVÁTH 1993].

A rift fázist követő termális szakasz után, a késő miocénban, illetve pliocénban a Pannon-medence képződése befejeződött. Ugyanekkor a térség területén szétszórtan posztextenziós alkáli bazaltos vulkanizmus zajlott [SZABÓ, HARANGI, CSONTOS 1992; EMBEY-ISZTIN et al. 1993; HARANGI 2001]. Az alkáli bazaltok esetenként nagymennyiségű, felsőköpeny eredetű, elsősorban peridotitos xenolitot hoztak a felszínre [pl. EMBEY-ISZTIN et al. 1989; DOWNES, EMBEY-ISZTIN, THIRLWALL 1992]. Az alkáli bazalt előfordulásai közül mind kiterjedését, vulkáni centrumainak számát, mind megkutatottságát tekintve a legjelentősebb a Bakony–Balaton-felvidéki vulkáni terület (BBFVT). A bazaltvulkánok közül a Tihanyi-vulkán korábbi K/Ar mérések, majd ugyanazon a közetpéldányon végzett  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  korolással kapott  $7,92 \pm 0,22$  millió éves radiometrikus kora alapján a Bakony–Balaton-felvidék eddigi legidősebb ismert vulkánjának tekinthető [BALOGH, NÉMETH 2005]. A terület részletes tanulmányozása alapján [NÉMETH, EMBEY-ISZTIN, THIRLWALL 2001] egy több kitérésű központból álló maar-vulkáni komplexum tagjait ismerte fel, ami Tihanyi Maar Vulkáni Komplexumként vonult be az irodalomba. A vizsgált xenolitok a Tihanyi-félsziget központi részéről — a Kiserdő-tető területéről — származnak, ahol NÉMETH, EMBEY-ISZTIN, THIRLWALL [2001] szerint a Keleti Maar kürtő közetegyüttesét lefedő maar tavi üledékek jelennek meg (1. ábra).

## 3. Az alkalmazott vizsgálati technikák és analitikai módszerek

**Polarizációs mikroszkóp:** szöveti megfigyelésekhez és az ásványok azonosításához a xenolitok mindkét oldalán polírozott vékonycsiszolatait Nikon CoolPIX E950 típusú fényképezőgéppel felszerelt Nikon Eclipse E600 Pol polarizációs mikroszkópon, illetve Nikon SMZ 800 típusú sztereomikroszkópon tanulmányoztuk az ELTE Közettani és Geokémiai Tanszékének Litoszféra Fluidum Kutató Laboratóriumában.

**Hűthető-fűthető tárgyasztali mikroszkóp:** a fluidum-zárványokban lejátszódó fázisátalakulások megfigyelését Leitz típusú mikroszkópra felszerelt FLUID Inc. USGS típusú, gázáramoltatású hűthető-fűthető tárgyasztalon végeztük el az ELTE Közettani és Geokémiai Tanszékének Litoszféra Fluidum Kutató Laboratóriumában.



1. ábra. A Tihanyi-félsziget vulkanosedimentológiai térképe, egy típusos szelvénye [NÉMETH, EMBEY-ISZTIN, THIRLWALL 2001], valamint a mintavételi helyek a rétegsorban

Fig. 1. Tihanyi Peninsula showing vulcanosedimentary rocks, and sampling locations [NÉMETH, EMBEY-ISZTIN, THIRLWALL 2001]. A typical cross-section (A-B) is also shown

**Raman-spektroszkópia:** A Raman-effektuson alapuló spektroszkópia segítségével különböző molekuláris felépítésű gáz, folyadék, illetve szilárd fázisú anyagok kis mennyiségű mintái is *roncsolásmentesen* vizsgálhatók. A Raman-effektus során a molekulát megvilágító fény egy része a mintával kölcsönhatásba kerül és ennek következtében rugalmatlanul szóródik. A kilépő Raman-sugárzás hullámszám-eltolódásának mértéke anyagi jellemző. A méréseket a BME Szerves Kémiai Technológia Tanszékén végeztük el LABRAM típusú Jobin Yvon-tervezésű, diszperziós elven működő konfokális, többcsatornás CCD detektorral felszerelt Raman spektrométeren, 532 nm hullámhosszú Nd-Y-Al-gránát (Nd-YAG) lézertűnyben. A névleges lézerteljesítmény 20mW volt. A lézersugár fókuszálását 100-szoros nagyítású objektív lencsével végeztük.

## 4. Petrográfia

### 4.1 Közetpetrográfia

A vizsgált közetzárványok általános jellemvonása, hogy olivinben és ortopiroxénben gazdagok. A vizsgált közetek szemcsemérete igen durva (2,5–3,0 mm, de akár 5 mm-es szemcsék is lehetnek). A Tihanyi-vulkán által felszínre szállított peridotitok döntő többsége a másutt ritkaságnak számító (durvaszemcsés) poikilites szövettípusba tartozik. A poikilites jelleg abban mutatkozik meg, hogy általában nagyméretű ortopiroxének zárnak magukba olivineket vagy klinopiroxéneket, de mindemellett a spinellek zárványként való megjelenése is általánosnak tekinthető [EMBEY-ISZTIN et al. 1989]. A tihanyi peridotit xenolitok litológiájának és szövettípusának kialakulásával részletesen FALUS, SZABÓ [2004] és HIDAS [2006] foglalkozott.

4.2. Fluidumzárvány petrográfia

A Tihanyról előkerült és korábban FALUS, SZABÓ [2004] és HIDAS [2006] által litológiailag tanulmányozott xenolitok közül hat mintát [öt harzburgit és egy lherzolit] választottunk ki a vizsgálatainkhoz, ugyanis a felsoroltak tartalmaznak polarizációs mikroszkóppal jól azonosítható, nagyszámú CO<sub>2</sub> fluidumzárványt (1. táblázat). Megjelenésük alapján a fluidumzárványok két nagy csoportra oszthatók: az I-típus negatív kristály alakú és szobahőmérsékleten

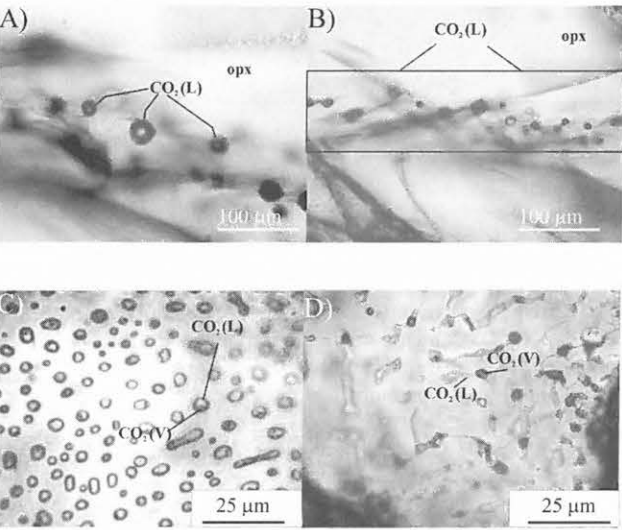
egyfázisú (2a. és 2b. ábra), a II-típus megnyúlt, kerekded, csepp alakú és általában kétfázisú zárványok (2c. és 2d. ábra). A két csoport között jelentős méretbeli különbség is megfigyelhető: az I-típus átlagos mérete 35–40 µm, addig a II-re egy ennél jóval kisebb, átlagosan 10 µm-es kiterjedés jellemző. A kisebb méretűek ortopiroxénben és olivinben egyaránt, míg a nagyobb méretűek kizárólag az ortopiroxénben csapdázódva találhatók. Egyes, ortopiroxénbe zárt, I-típusba tartozó CO<sub>2</sub> zárványsíkokban romboéderes szilárd fázis is látható.

| peridotit | ol (mod%) | opx (mod%) | cpx (mod%) | sp (mod%) | opx/cpx | kőzetnév   | szövet típus    |
|-----------|-----------|------------|------------|-----------|---------|------------|-----------------|
| Tih03-04  | 72,6      | 22,6       | 3,8        | 0,9       | 6,0     | harzburgit | poikilites      |
| Tih03-10  | 85,6      | 10,1       | 2,4        | 1,9       | 4,2     | harzburgit | protogranuláris |
| Tih03-13  | 89,2      | 9,2        | 0,9        | 0,8       | 10,2    | harzburgit | protogranuláris |
| Tih05-04  | 72,4      | 24,4       | 2,3        | 1,0       | 10,6    | harzburgit | poikilites      |
| Tih05-07  | 55,1      | 41,8       | 2,5        | 0,6       | 16,7    | harzburgit | poikilites      |
| Tih05-09  | 58,5      | 26,3       | 12,4       | 2,8       | 2,1     | lherzolit  | poikilites      |

1. táblázat. A vizsgált peridotit xenolitok modális összetétele, kőzettípusa és szövete  
Table 1. The modal compositions, rock type and texture of the studied peridotite xenoliths

5. Mikrotermometria

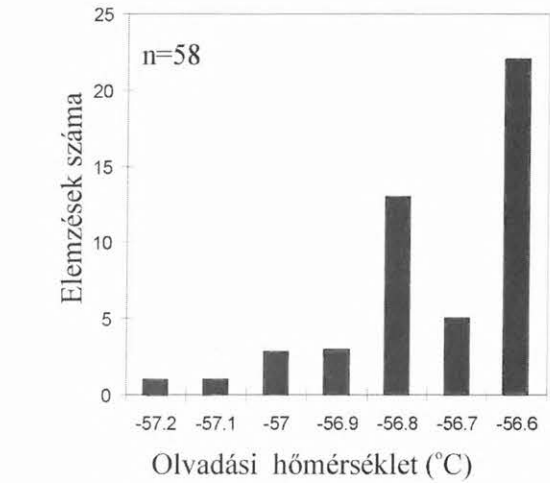
A mikrotermometriai mérésorozat segítségével a fluidummal kitöltött zárványok minőségi (olvadási hőmérséklet) és mennyiségi (homogenizációs hőmérséklet) tulajdonságáról szerezhetünk információt.



2. ábra. CO<sub>2</sub> fluidumzárványok típusa és jellegzetes előfordulása a tihanyi peridotit xenolitokban; a) és b) I-típusú CO<sub>2</sub> fluidumzárványok: nagy méretűek, negatív kristály alakúak, szobahőmérsékleten egyfázisúak (folyadék), beforrt repedések mentén jelennek meg; c) és d) II-típusú CO<sub>2</sub> fluidumzárványok: kis méretűek, szobahőmérsékleten kétfázisúak (gáz és folyadék), szabálytalan alakúak. CO<sub>2</sub> (L) — folyadék CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> (V) — gáz CO<sub>2</sub> a fluidumzárványban; opx — ortopiroxén. Közzetani mikroszkóppal, áteső polarizált fénnel készült felvétel, 1 N

Fig. 2. Photomicrograph of CO<sub>2</sub> fluid inclusions hosted by peridotite xenoliths from Tihany; a) and b) type-I CO<sub>2</sub> fluid inclusions characterized by large size, negative crystal shape, one (liquid) phase at ambient condition and occurrence along healed fractures; c) and d) type-II CO<sub>2</sub> fluid inclusions characterized by small size, irregular shape, two (liquid and gas) phase. CO<sub>2</sub> (L) — liquid CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> (V) — vapor CO<sub>2</sub> in fluid inclusions; opx — orthopyroxene. Plane polarized light, 1 N

A megvizsgált, –150 °C-ra hűtött, majd felfűtött fluidumzárványok nagy többsége, petrográfiai csoportosításuktól függetlenül (I- vagy II-típus) –56,6 ± 0,3 °C-on mutatott teljes olvadást, amely tiszta vagy közel tiszta CO<sub>2</sub>-ra jellemző olvadási hőmérséklet (3. ábra). Az ettől eltérő olvadási hőmérsékletértékeket mutató zárványok — összesen öt darab — esetében feltételeztük, hogy a CO<sub>2</sub> mellett (kis mennyiségben) egyéb fluidumkomponens tölti ki a zárványokat. A választ a Raman-spektroszkópos vizsgálatokban kerestük.



3. ábra. Tihanyi peridotit xenolitokban elemzett I- és II-típusú CO<sub>2</sub> fluidumzárványok olvadási hőmérséklet hisztogramja

Fig. 3. Distribution of melting temperatures in type-I and type-II CO<sub>2</sub> fluid inclusions occurring in Tihany peridotite xenoliths

A homogenizációs hőmérsékletek eloszlása bimodális, ami jó egyezést mutat a petrográfiai csoportosítással: az I-típusú ortopiroxénbe fogódott zárványokban –41 – –12 °C homogenizációs hőmérséklettartománnyal jellemzett, azaz nagyobb sűrűségű CO<sub>2</sub>-gazdag; a II-típusú olivinbe és ortopiroxénbe fogódott zárványokban –11 – +8 °C homogenizációs hőmérséklettartománnyal jellemzett, azaz kisebb sűrűségű CO<sub>2</sub>-gazdag fluidumot mértünk (2. táblázat).



| Mintaszám             | Th (°C) | Sűrűség (g/cm <sup>3</sup> ) | Egyensúlyi hőmérséklet (±16 °C) | Minimum bezáródási nyomás (GPa) | Mintaszám             | Th (°C)       | Sűrűség (g/cm <sup>3</sup> ) | Egyensúlyi hőmérséklet (±16 °C) | Minimum bezáródási nyomás (GPa) |
|-----------------------|---------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Tih 03-04, harzburgit | -14,70  | 1,01                         | 955                             | 0,72                            | Tih 05-07, harzburgit | -15,93        | 1,01                         | 1150                            | 0,84                            |
|                       | -16,60  | 1,02                         | 955                             | 0,73                            |                       | -14,73        | 1,01                         | 1150                            | 0,83                            |
|                       | -10,90  | 0,99                         | 955                             | 0,68                            |                       | -12,83        | 1,00                         | 1150                            | 0,81                            |
|                       | -4,20   | 0,95                         | 955                             | 0,63                            |                       | -3,53         | 0,95                         | 1150                            | 0,72                            |
|                       | -2,80   | 0,94                         | 955                             | 0,61                            |                       | -25,83        | 1,06                         | 1150                            | 0,93                            |
|                       | 3,60    | 0,91                         | 955                             | 0,56                            |                       | -22,53        | 1,04                         | 1150                            | 0,90                            |
|                       | 0,00    | 0,93                         | 955                             | 0,59                            |                       | -14,83        | 1,01                         | 1150                            | 0,83                            |
|                       | 4,00    | 0,90                         | 955                             | 0,55                            |                       | -10,33        | 0,98                         | 1150                            | 0,79                            |
|                       | 4,90    | 0,90                         | 955                             | 0,54                            |                       | -21,43        | 1,04                         | 1150                            | 0,89                            |
|                       | -2,80   | 0,94                         | 955                             | 0,61                            |                       | -20,73        | 1,04                         | 1150                            | 0,89                            |
| Tih 03-10, harzburgit | 5,20    | 0,89                         | 955                             | 0,54                            | Tih 05-09, harzburgit | -20,90        | 1,04                         | 1165                            | 0,90                            |
|                       | -21,02  | 1,04                         | 1070                            | 0,84                            |                       | <b>-41,40</b> | <b>1,12</b>                  | <b>1165</b>                     | <b>1,09</b>                     |
|                       | -23,92  | 1,05                         | 1070                            | 0,87                            |                       | -36,60        | 1,10                         | 1165                            | 1,05                            |
|                       | -27,62  | 1,07                         | 1070                            | 0,90                            |                       | -11,10        | 0,99                         | 1165                            | 0,80                            |
|                       | -16,72  | 1,02                         | 1070                            | 0,80                            |                       | -12,90        | 1,00                         | 1165                            | 0,82                            |
|                       | -13,12  | 1,00                         | 1070                            | 0,77                            |                       | -22,30        | 1,04                         | 1165                            | 0,91                            |
|                       | -3,62   | 0,95                         | 1070                            | 0,68                            |                       | -21,30        | 1,04                         | 1165                            | 0,90                            |
|                       | -25,92  | 1,06                         | 1070                            | 0,89                            | Tih 03-13, harzburgit | -24,00        | 1,05                         | 1120                            | 0,90                            |
|                       | -20,32  | 1,03                         | 1070                            | 0,84                            |                       | -16,00        | 1,01                         | 1120                            | 0,82                            |
| Tih 05-04, harzburgit | -17,82  | 1,02                         | 1070                            | 0,81                            |                       | -20,10        | 1,03                         | 1120                            | 0,86                            |
|                       | -17,63  | 1,02                         | 925                             | 0,73                            |                       | -17,80        | 1,02                         | 1120                            | 0,84                            |
|                       | -5,60   | 0,96                         | 925                             | 0,62                            |                       | -24,30        | 1,05                         | 1120                            | 0,90                            |
|                       | 7,80    | 0,87                         | 925                             | 0,49                            |                       | -22,10        | 1,04                         | 1120                            | 0,88                            |
|                       | 4,33    | 0,90                         | 925                             | 0,53                            |                       | -26,10        | 1,06                         | 1120                            | 0,92                            |
|                       | -2,50   | 0,94                         | 925                             | 0,59                            |                       | -24,80        | 1,05                         | 1120                            | 0,91                            |
|                       | -10,00  | 0,98                         | 925                             | 0,66                            |                       | -29,70        | 1,07                         | 1120                            | 0,95                            |
|                       | -4,00   | 0,95                         | 925                             | 0,60                            |                       | -26,20        | 1,06                         | 1120                            | 0,92                            |
|                       | 2,70    | 0,91                         | 925                             | 0,55                            |                       |               |                              |                                 |                                 |
|                       | -2,70   | 0,94                         | 925                             | 0,59                            |                       |               |                              |                                 |                                 |

2. táblázat. A vizsgált CO<sub>2</sub> fluidumzárványok homogenizációs hőmérséklet-, valamint sűrűségértékei (amelyeket a BULK program [BAKKER 2003] segítségével számoltunk ki), egyensúlyi hőmérsékletek [HIDAS 2006] és mindezek alapján a minimum csapdázódási mélység értékek (amelyeket az ISOC program [BAKKER 2003] segítségével számoltunk ki).

A szürke cellák a nagyobb egyensúlyi hőmérsékletű peridotitokat jelzik

Table 2. Homogenization temperature and density values (using the BULK software [BAKKER 2003]) of the individual CO<sub>2</sub> fluid inclusions, the calculated equilibrium temperatures [HIDAS 2006], and the minimum trapping pressures (based on densities and equilibrium temperatures calculated using the ISOC software [BAKKER 2003]). Grey cells show the peridotites determined by higher equilibrium temperature

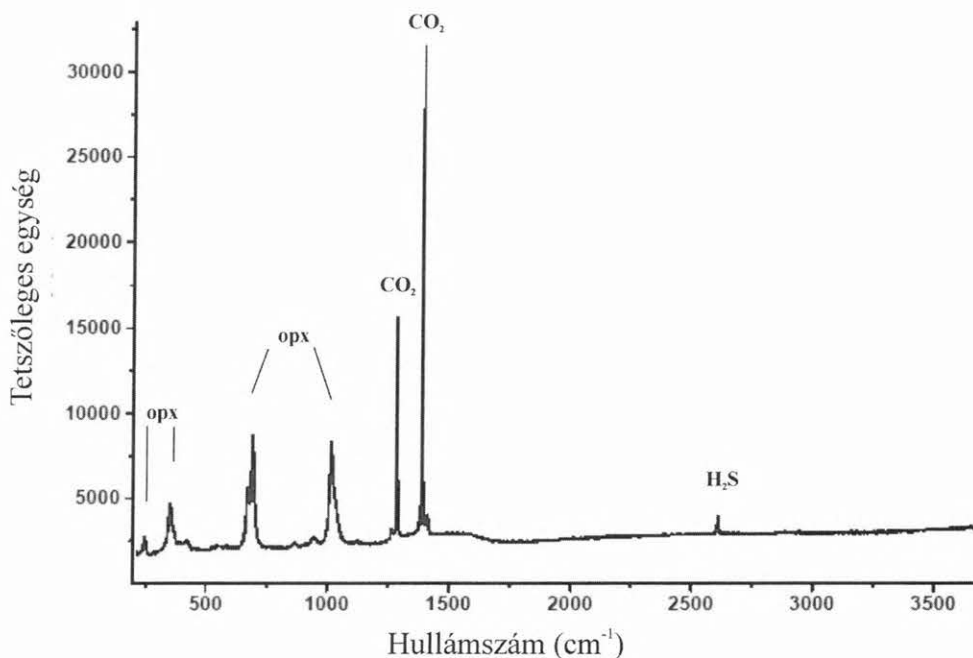
## 6. Raman-spektroszkópia

A Raman-spektroszkópot a mikrotermometriával be nem azonosítható komponensek minőségi és mennyiségi meghatározására használtuk. Azon individuális zárványok mérése történt meg, amelyek a -56,6 °C-tól eltérő olvadási hőmérsékletet mutatták. Az eredmények szerint a Tih 03-10 harzburgitban mért, a műszeres hibát meghaladó mértékben eltérő olvadási hőmérsékleteket mutató zárványok (összesen öt) spektrumában a 2610–2611 cm<sup>-1</sup>-es Raman-eltolódás között kis intenzitású csúcsot mutatnak, ami a H<sub>2</sub>S-re jellemző karakterisztikus Raman-eltolódásérték [KERKHOF, OLSEN 1990]. A Raman-spektrumokon megjelenő CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>S rendszerű zárványok komponenseinek mennyiségi meghatározását a Placzek-formula [BURKE 2001] segítségével végeztük (móltörtben): a H<sub>2</sub>S 0,004–0,011, a CO<sub>2</sub> 0,996–0,989 közötti értékeket adott (4. ábra).

## 7. Az eredmények értékelése

A zárványként bezáródott fluidum sűrűsége a bezáródási nyomástól és hőmérséklettől függ. A mikrotermometriai mérőszorozatból nyert olvadási hőmérsékletértékekből, valamint a Raman-spektroszkópos eredményekből a kémiai komponens(ek) meghatározása vált lehetővé. A homogenizációs hőmérsékletértékek ugyanakkor a zárványt kitöltő fluidum sűrűségével vannak összefüggésben.

A homogenizációs hőmérséklet–sűrűség összefüggést a BULK szoftverrel határoztuk meg minden egyéni fluidumzárványra [BAKKER 2003]. Mivel ez az érték függ a nyomástól és a hőmérséklettől, a hőmérséklet meghatározásával minimum csapdázódási nyomás becsülhető. A tihanyi peridotit xenolitok egyensúlyi hőmérsékletbecslését BREY, KÖHLER [1990] geotermométere alapján FALUS, SZABÓ [2004] és HIDAS [2006] végezte el (2. táblázat). A sűrűségből és a geotermométerből nyert minimum csapdázódási nyomást az ISOC szoftver segítségével számoltuk ki [BAKKER 2003] (2. táblázat).



4. ábra. H<sub>2</sub>S Raman-spektruma I-típusú CO<sub>2</sub> fluidumzárványban ortopiroxénbe zárva tihanyi peridotit xenolitban

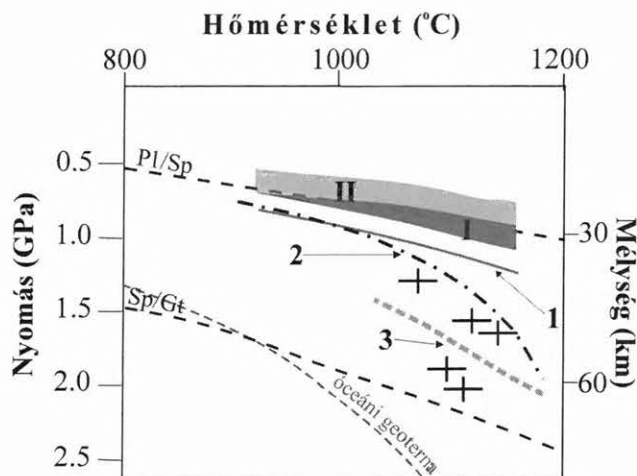
Fig. 4. Raman spectra of H<sub>2</sub>S–CO<sub>2</sub> fluid inclusion in type-I hosted in orthopyroxene from Tihany peridotite xenolith

A xenolitokban meghatározott egyensúlyi hőmérséklet-értékek a Tihanyról előkerült peridotitokat két, egymástól jól elkülöníthető csoportra osztják: egy 925–980 °C és egy 1020–1165 °C hőmérséklet-tartományúra. A hat vizsgált xenolit közül a kisebb hőmérsékletű csoportot a Tih 03-04 és a Tih 05-04 harzburgitok, a nagyobb hőmérsékletűt a Tih 03-10, Tih 03-13, Tih 05-07 harzburgitok és a Tih 05-09 lherzolit képviselik (1. táblázat). A CO<sub>2</sub>-sűrűségből számolt értékek szerint a kisebb hőmérsékletekhez kisebb, a nagyobb hőmérsékletűekhez rendre nagyobb minimum csapdázódási nyomásérték rendelhető (5. ábra). A fluidumzárványok petrográfiai megfigyelései alapján tett csoportosítások szerint a legnagyobb minimum csapdázódási nyomásértékeket (0,87–1,09 GPa) mindig az I-típusú zárványok adták, míg a sekélyebb mélységhez tartozó nyomásértékek (0,49–0,87 GPa) a II-típusú zárványokhoz köthetők. A nyomásértékekben megfigyelhető tendencia nem a számított egyensúlyi hőmérséklet nagyobb értékeiből adódik, hiszen a nagyobb nyomást mutató CO<sub>2</sub>-zárványok mért sűrűsége is nagyobb. Mindezek alapján feltételezhető, hogy az egyensúlyi hőmérsékletek alapján elkülönített peridotit sorozat forrása vertikálisan egymás alatt helyezkedett el, azaz a xenolitok egy sekélyebb és egy mélyebb köpenydoménból származnak. HIDAS [2006] a peridotitokon JAMES et al. [2004] munkája alapján primer- és szekunderhullám-terjedési sebességeket, illetve teljes közetre viszonyított sűrűségeket számolt és hasonló következtetésre jutott. Ez a tény nagy jelentőségű a fosszilis nyomás–hőmérséklet viszony megismerésében, hiszen módunkban állt a sekélyebb és a mélyebb „köpenyrész” viszonyából az egykori geoterma egy szakaszának becslésére, amelynek megismerése nem abszolút nyomás–hőmérséklet értékeket jelent, hanem meredekséget. A Pannon-medence központi része alatti mélyebb helyzetű geoterma becslése nehézségekkel terhelt. A Kisalföldről származó, a tihanyi mintáktól fiatalabb alkáli bazaltok által megmintázott peridotitok

szimplektitjeinek geokémiai vizsgálatát FALUS et al. [2006] végezték el. A szimplektitek egykori gránátok széteséséhez kapcsolódnak, kémiai összetételük visszaszámolása révén pedig lehetőség nyílt a nagyobb mélységben stabil gránát peridotitokra felállított geotermobarométerek használatára. Habár a FALUS et al. [2006] által vizsgált közetzárványok és a tihanyi xenolitok nem ugyanarról a területről származnak, és a felsőköpeny megmintázása sem egy időben történt, a jelen munkában a tihanyi fluidumzárvány-méréseken alapuló vizsgálatok során kapott geoterma szakaszával a kisalföldiek összevethetők, ami a módszer alkalmazhatóságát jelzi (5. ábra). A CO<sub>2</sub>-zárványokon alapuló nyomásbecslés és az alkalmazott geotermométer alapján — azaz 925–1165 °C (±16) közötti hőmérséklettartományban — a nagy hőmérsékletű peridotitok körülbelül 12 °C/km hőmérséklet-gradienst mutatnak. Ezzel összhangban a nagyhőmérsékletű sorozatra a KÖHLER, BREY [1990] munkáján alapuló spinell peridotitokra felállított geobarométer hozzávetőleges becsléssel 13,5 °C/km [HIDAS 2006] gradienst adott (5. ábra). A két módszerből kapott eredmények azt sugallják, hogy a Tihany alatti köpenylitoszférában megmintázásuk idejében, azaz körülbelül nyolc millió évvel ezelőtt 12–13 °C/km gradiens volt a jellemző.

## 8. Következtetések

- A tihanyi peridotit xenolitok nagy mennyiségű CO<sub>2</sub> fluidumzárványt tartalmaznak.
- Két fluidumgeneráció különíthető el:
  - 1) ortopiroxénhez kötődő, negatív kristály alakú, nagyobb sűrűségű fluidumzárvány;
  - 2) az ortopiroxénhez és olivinhez egyaránt köthető, általában csepp alakú, kisebb sűrűségű fluidumzárvány.
- A fluidumzárványok összetétele tiszta, illetve közel tiszta CO<sub>2</sub>, ez utóbbi esetében nyomnyi mennyiségben H<sub>2</sub>S jelenik meg.



5. ábra. A tihanyi peridotit xenolitok nyomás (mélység)–hőmérséklet diagramja a becsült geotermákkal; I–I-típusú CO<sub>2</sub> fluidumzárványok termometriai adataiból számolt minimum bezáródási nyomás–hőmérséklet mező; II–II-típusú CO<sub>2</sub> fluidumzárványok termometriai adataiból számolt minimum bezáródási nyomás–hőmérséklet mező; 1–a tihanyi I- és II-típusú CO<sub>2</sub> fluidumzárványokból számolt, 8 millió évvel ezelőtti geotermia szakaszának becsült meredeksége; 2–kisalföldi peridotit xenolitokból becsült geotermia FALUS et al. [2006] után (bővebben a szövegben); 3–a tihanyi peridotit xenolitok számolt geotermája BREY, KÖHLER [1990], valamint KÖHLER, BREY [1990] geotermometriai és -barometriai egyenlete alapján; + — a BREY, KÖHLER [1990] termométer valamint KÖHLER ÉS BREY [1990] barométerrel kapott, hibával terhelt értékek helyei. Plagioklász/spinell, és spinell/gránát határfelületek, valamint az óceáni geotermia O'REILLY, GRIFFIN [1996] után

Fig. 5. Pressure (depth)–temperature diagram for Tihany peridotite xenoliths, showing also estimated geotherms; I–estimated geotherm based on calculated minimum trapping pressure–temperature field for Type-I CO<sub>2</sub> fluid inclusions; II–estimated geotherm based on calculated minimum trapping pressure–temperature field for Type-II CO<sub>2</sub> fluid inclusions; 1–estimated late Miocene (8 M.y.) geotherm based Type-I and Type-II CO<sub>2</sub> fluid inclusions in Tihany peridotite xenoliths; 2–estimated geotherm for Little Hungarian Plain peridotite xenoliths by FALUS et al. [2006] (see details in text); 3–estimated geotherm by use of geothermometer of BREY, KÖHLER [1990] and of geobarometer of KÖHLER, BREY [1990] for Tihany peridotite xenoliths; + — calculated values of Tihany peridotites showing the error bars by using of geothermometer of BREY, KÖHLER [1990] and of geobarometer of KÖHLER, BREY [1990] for Tihany peridotite xenoliths. Phase boundaries of plagioclase/spinel and spinel/garnet, and ocean geotherm are taken from O'REILLY, GRIFFIN [1996]

- A kisebb hőmérsékletű (925–980 °C) xenolitokban található fluidumzárványok minimális csapdázódási nyomása 0,49–0,87 GPa, míg a nagyobb hőmérsékletű (1020–1165 °C) xenolitokban találhatók 0,87–1,09 GPa.
- Az alkáli bazaltos vulkáni tevékenység a Tihany alatti köpenylitoszféra két, egymással vertikálisan elkülöníthető köpenydoménjét mintázhatta meg és hozta a felszínre, tehát minimum fosszilis nyomás becslésére alkalmas.
- A zárványokból és a teljes közetre számított egyensúlyi hőmérsékletértékből a 8 millió évvel ezelőtti geotermia egy szakasza becsülhető meg, meredeksége körülbelül 12 °C/km-nek adódott.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk dr. MAROSI Györgynek és SZABÓ Andrásnak a Raman-spektroszkópiai berendezés használatáért. Dr. FALUS Györgynek és dr. TÖRÖK Kálmánnak a cikk alapos elbírálását, valamint építő kritikái megjegyzéseiket köszönjük. Köszönet továbbá a Litoszféra Fluidum Kutató Labor minden tagjának. A munkát az Országos Tudományos Kutatási Alap (T 043686 sz. OTKA pályázat) támogatta.

Jelen cikk az ELTE Közöttani és Geokémiai Tanszéken működő Litoszféra Fluidum Kutató Labor 37. publikációja.

## HIVATKOZÁSOK

- ANDERSEN T., NEUMANN E.-R. 2001: Fluid inclusions in mantle xenoliths. *Lithos* **55**, 301–320
- BAKKER R. J. 2003: Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology* **194**, 1–3, 3–23
- BALOGH K., NÉMETH K. 2005: Evidence for the Neogene small-volume intracontinental volcanism in Western Hungary: K/Ar geochronology of the Tihany Maar Volcanic Complex. *Geologica Carpathica* **56**, 91–99
- BERGMAN S. C., DUBESSY J. 1984: CO<sub>2</sub>–CO fluid inclusions in a composite peridotite xenolith: implications for upper mantle oxygen fugacity. *Contrib. Mineral. Petrol.* **85**, 1–13
- BREY G. P., KÖHLER T. P. 1990: Geothermobarometry in four phase lherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology* **31**, 1353–1378
- BURKE E. A. J. 2001: Raman microspectrometry of fluid inclusions, *Lithos* **55**, 1–4, 139–158
- CSONTOS L. 1995: Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review. *Acta Vulcanologica* **7**, 1–13
- DE VIVO B., LIMA A., SCHIRIBANO V. 1990: CO<sub>2</sub> fluid inclusions in ultramafic xenoliths from the Iblean Plateau, Sicily, Italy. *Mineralogical Magazine* **54**, 183–194
- DOWNES H., EMBEY-ISZTIN A., THIRLWALL M. F. 1992: Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from the western Pannonian Basin (Hungary): evidence for an association between enrichment and texture in the upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **107**, 340–354
- EMBEY-ISZTIN A., DOWNES H., JAMES D. E., UPTON B. G. J., DOBOSI G., INGRAM G., HARMON R. S., SCHARBERT H. G. 1993: The petrogenesis of Pliocene alkaline volcanic rocks from the Pannonian Basin, Eastern Central Europe. *Journal of Petrology* **34**, 317–343
- EMBEY-ISZTIN A., SCHARBERT H. G., DIETRICH H., POULTIDIS H. 1989: Petrology and geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from the Transdanubian Volcanic Region. *Journal of Petrology* **30**, 79–105
- FALUS GY., SZABÓ CS. 2004: Felsőköpeny eredetű xenolitok Tihanyról: nyomon követhető litoszféra-fejlődés a Bakony–Balaton-felvidék vulkáni területén? *Földtani Közlemény* **134**, 4, 499–520
- FALUS GY., SZABÓ CS., KOVÁCS I., ZAJACZ Z., HALTER W. 2006: Symplectite in spinel lherzolite xenoliths from the Little Hungarian Plain, Western Hungary: A key for understanding the complex history of the upper mantle of the Pannonian Basin, doi:10.1016/j.lithos.2006.06.017.
- FODOR L., CSONTOS L., BADA G., GYÖRFY I., BENKOVICS L. 1999: Tertiary tectonic evolution of the Pannonian Basin System and

- neighbouring orogens: a new synthesis of paleostress data. In: DURAND B., JOLIVET L., HORVÁTH F., SÉRANNE M. (Eds): *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. Geol. Soc. London. Spec. Publ. **156**, 295–334
- FREZZOTTI M. L., ANDERSEN T., NEUMANN E.-R., SIMONSEN S. L. 2002: Carbonatite melt–CO<sub>2</sub> fluid inclusions in mantle xenoliths from Tenerife, Canary Islands: a story of trapping, immiscibility and fluid–rock interaction in the upper mantle. *Lithos* **64**, 3–4, 77–96
- HARANGI SZ. 2001: Neogene to Quaternary Volcanism of the Carpathian–Pannonian Region — a review. *Acta Geol. Hung.* **4**, 2–3, 223–258
- HIDAS K. 2006: A Bakony–Balaton-felvidéki vulkáni terület legkorábban megmintázott litoszférájának közettani és geokémiai jellemvonásai a Tihanyi-vulkán xenolitjai alapján. Diplomadolgozat, ELTE TTK Közettani és Geokémiai Tanszék, 126 o.
- HORVÁTH F. 1993: Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian Basin. *Tectonophysics* **226**, 235–248
- HUISMANS R. S., PODLADCHIKOV Y. Y., CLOETINGH S. 2001: Dynamic modeling of the transition from passive to active rifting, application to the Pannonian Basin. *Tectonics* **20**, 1021–1039
- JAMES D. E., BOYD F. R., SCHUTT D., BELL D. R., CARLSON R. W. 2004: Xenolith constraints in seismic velocities in the upper mantle beneath southern Africa. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G<sup>3</sup>)* **5**, 1, 1–32
- KERKHOF A. M. VAN DEN, OLSEN S. N. 1990: A natural example of superdense CO<sub>2</sub> inclusions: microthermometry and Raman analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 895–901
- KÖHLER T. P., BREY G. P. 1990: Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **54**, 2375–2388
- MERCIER J.-C. C. 1980: Single pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics* **70**, 1–37
- NÉMETH K., EMBEY-ISZTIN A., THIRLWALL SZ. 2001: Miocene phreatomagmatic volcanism at Tihany (Pannonian Basin, Hungary). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **111**, 111–135
- O'NEILL St. H. 1981: The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contrib. Mineral. Petrol.* **77**, 185–194
- O'REILLY S. Y., GRIFFIN W. L. 1996: 4-D Lithosphere Mapping: methodology and examples. *Tectonophysics* **262**, 3–18
- POSGAY K., BODOKY T., HEGEDŰS E., KOVÁCSVÖLGYI S., LENKEY L., SZAFIÁN P., TAKÁCS E., TIMÁR Z., VARGA G. 1995: Asthenospheric structure beneath a Neogene basin in Southeast-Hungary. *Tectonophysics* **252**, 467–484
- ROEDDER E. 1984: Fluid Inclusions. *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy* **2**, 644 p.
- SPAN R., WAGNER W. 1996: A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. **25**, 1513–1558
- STEGEN A. L., GÉCZY B., HORVÁTH F. 1975: Late Cenozoic evolution of the Pannonian Basin. *Tectonophysics* **26**, 71–90
- SZABÓ CS., BODNAR R. J. 1996: Changing magma ascent rates in the Nógrád–Gömör Volcanic Field Northern Hungary/Southern Slovakia: Evidence from CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions in metasomatized upper mantle xenoliths. *Petrology* **4**, 3, 221–230
- SZABÓ CS., HARANGI SZ., CSONTOS L. 1992: Review of Neogene and Quaternary volcanism of the Carpathian–Pannonian Region. *Tectonophysics* **208**, 243–256
- TÖRÖK K., DE VIVO B. 1995: Fluid inclusions in upper mantle xenoliths from the Balaton Highland, Western Hungary. *Acta Vulcanologica* **7**, 277–284