

**Cirkonalapú kutatások a Kárpát–Pannon  
térység neogén-kvarter Si-gazdag vulkáni  
képződményeinek korára, rétegtani  
szerepére és petrogenézisére**

**MTA doktori rövid értekezés tézisei**

**Lukács Réka**  
**(Haranginé Lukács Réka)**

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont  
Földtani és Geokémiai Intézet  
HUN-REN-ELTE Vulkanológiai Kutatócsoport

Budapest, 2024

## 1. BEVEZETÉS

A vulkáni működés jobb megértése, a kitörések előrejelzése, lefolyásának és okainak megismerése a földtudományi kutatások egyik fontos területe, amire egyre nagyobb társadalmi igény is van. Bolygónk lakossága különösen vonzódik a vulkáni területekhez, ott ugyanis termékenyebb a talaj, építőköveket adnak, kulcsfontosságú fémeket és ritka elemeket koncentrálnak a felszín közelében, továbbá a vulkánok egyre nagyobb szerepet kapnak a turizmusban. A Föld népességének növekedésével azonban így egyre több ember él olyan térségben, ahol számottevő a vulkáni veszély (Aspinall et al., 2011). Csak az elmúlt évtizedben számos olyan vulkánkitörés történt, ami településeket tett lakhatatlanná és jelentős károkat okozott. A legnagyobb rombolást a kaldera összeomlással járó, több száz köbkilométer vulkáni anyagot felszínre hozó kitörések okozzák (Wilson et al., 2021), amelyre eddig a modern történelemben még nem volt példa, de a jövőben bekövetkezhetnek. Egy Tambora-nagyságú vagy akár egy szupervulkáni kitörés valószínűsége is nagyobb, mint egy pusztító meteoritbecsapódásé, mégis az utóbbira jelentősebb a figyelem és az anyagi ráfordítás (Papale, 2018; Papale et al. 2021).

Egy vulkán természete, kitörésre való hajlama, a vulkánkitörés nagysága, az alatta lévő magmatározó rendszer állapotától függ. A 21. század kutatásaiban ezért kiemelt figyelmet kapnak a vulkánok alatti magmás folyamatok, ezen belül az, hogy hogyan és mennyi idő alatt jöhet(ett) létre egy magmatározó, mennyi ideig lehet olvadáktartalmú magmás test a földkéregben, a fizikailag kitörésre nem képes kristálykásaanyagból hogyan és milyen gyorsan alakul ki a kitörésre képes magmatömeg (pl. Bachmann és Huber, 2018; Cooper, 2019; Edmonds et al., 2019; Sparks et al., 2019). Ezekre a választ a korábbi vulkánkitörések képződményeinek, azaz a vulkáni kőzetek vizsgálatán keresztül adhatjuk meg.

Vulkánkitörések különböző tektonikai helyzetekben fordulnak elő, a kapcsolódó magmás folyamatok (magmaképződés, magmatározók kialakulása, vulkánkitörés) pedig szoros összefüggést mutatnak a lemeztektonikai környezettel, a szerkezeti mozgásokkal. Ezért a vulkáni és magmás kőzetek vizsgálatával jelentősen hozzájárulhatunk egy térség geodinamikai fejlődéstörténetének jobb megértéséhez.

A vulkáni események a földtörténetben szinte pillanatszerűnek tekinthetők, ami miatt ezek idejének radiometrikus kormeghatározása alapvető információt ad a rétegtan számára. Továbbá a vulkánkitörések korának, gyakoriságának és méretének pontosításával következtethetünk azok környezeti hatásaira is. A vulkánkitörések között eltelt szunnyadási

időszakok hossza fontos információt ad, többek között annak megértéséhez, hogy egyes vulkánok hosszú nyugalmi idő után is feléledhetnek.

A Kárpát–Pannon térség egy természeti laboratóriumnak tekinthető, mivel az elmúlt 20 millió évben a Pannon-medence kialakulása, a földkéreg és a litoszféra szerkezetalakulása, továbbá a rendkívül változatos és intenzív vulkáni működés kapcsolata számos, az előzőekben érintett, tudományos kulcskérdés vizsgálatára ad lehetőséget. A vulkáni működés okának feltárására, köszönhetően a folyamatosan fejlődő műszeres analitikai technikának, új kutatási irányok alakultak ki az elmúlt két évtizedben, ezekben pedig különösen nagy szerepet kaptak a cirkonkristályon alapuló geokronológiai, geokémiai és petrogenetikai vizsgálatok.

A cirkon egy olyan, Si-gazdag magmás kőzetekben, akcesszórikus mennyiségben általánosan előforduló szilikátásvány, amely különösen ellenálló a kémiai és mechanikai folyamatokkal szemben. Földtani különlegességét és fontosságát többek között az adja, hogy számos nyomelemet épít be szerkezetébe, így kristályrácsába urán (100-1000 ppm) és tórium (10-100 ppm) is helyet kaphat. Az urán és tórium egyes izotópjai radioaktív bomlással különböző tórium és ólom izotópot termelnek. Ezekre az izotópokra a záródási hőmérséklet  $>900$  °C, ami azt jelenti, hogy magmás hőmérsékleten, a kristály keletkezése során már zárt rendszer alakul ki, azaz a lebomló és keletkező izotópok a cirkon kristályrácsában maradnak. Az U-Th-Pb izotóparányok mérése során kapott adatokból számolt kor tehát a kristályosodás idejét adja meg. Mindezek miatt a cirkon a legszélesebb körben használt geokronométer. A cirkonkristályok szerkezetébe beépülő további nyomelemek (pl. Hf, Y, ritkaföldfémek, Nb, Ta, P, Al, Ti) és izotópok (pl. hafnium és oxigén izotópjai) fontos információt nyújtanak a befogadó magma jellegére, a kristályosodás körülményeire, azaz a petrogenetikai folyamatokra. A kutatásaimban használt cirkon petrokronológia módszere mindezeket az időbeli és geokémiai információkat együttesen értékeli.

Az MTA doktori rövid értekezésemben azokat a kutatási eredményeimet összegzem, amelyekben a vulkánok kitöréseinek korát, azok gyakoriságát, a kapcsolódó magmatározók fennállási idejét, a magma petrogenetikai fejlődését, a vulkanizmus geodinamikai környezetét, a kitörési képződmények rétegtani szerepét elsősorban a kőzetekben előforduló cirkonkristályokból kinyerhető információkra alapoztam. Két nagyobb kutatási célterület cirkonalapú vizsgálatainak eredményeiről adok számot: (1) a Pannon-medence kora–középső miocén Si-gazdag robbanásos vulkáni képződményei és (2) a Dél-Hargita vulkáni területének képződményei.

(1) Több mint két évtizede vizsgálom a Pannon-medence miocén korú, nagy szilíciumtartalmú vulkánkitöréseinek képződményeit, hogy jobban megértem a kitörés előtti magmatározó folyamatokat, meghatározzam a kitörések korát és gyakoriságát, valamint felmérjem a kitörések méretét a vulkáni kőzetek térbeli korrelációja segítségével. A Pannon-medencében ezek a képződmények nagy területen a mélyben, fiatalabb üledékekkel fedetten, fúrásokból ismertek, a felszínen csupán néhány helyen tárulnak fel. Kutatásaim, amellet, hogy kevés fúrási anyagot is lehetőségem volt megvizsgálni, főként a felszíni előfordulásokra koncentráltak, nevezetesen a Bükkalja vulkáni területen és a Tokaji-hegység területén megjelenő piroklasztitokra. Elemeztem továbbá olyan előfordulásokat is, amelyek a tágabb Kárpát–Pannon térségén belül vagy azon túl jelennek meg, és e nagy vulkánkitörések távol lerakódott (disztális) vulkáni üledékei lehetnek. Az elsők között publikált két cirkonalapú cikkünk jelentős hatással volt tudományterületünkre (CMP, 2015: 116 db és ESR, 2018: 64 db független hivatkozás; MTMT) és számos magyarországi, valamint szomszédos országbeli szakember kért fel együttműködésre. Ezeknek a kutatásoknak az eredményeit 2014 óta 12 db folyóirat publikációban közöltük és a kutatómunka jelenleg is tart. Kutatómunkámat 4 általam vezetett NKFIH OTKA projekt (2 PD, 1 FK és 1 K), 2 Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és 2 ÚNKP Bolyai+ ösztöndíj támogatta.

(2) Kutatómunkám másik fókuszja a Dél-Hargita, különösen a Csomád vulkáni terület vulkanizmusa volt. 2013-ban Magyary Zoltán Posztdoktori ösztöndíjasként, 8 év karrierszünet után, a Kárpát–Pannon térség legfiatalabb vulkáni kitöréseivel kezdetben foglalkozni, elsősorban a vulkáni kőzetekben megjelenő cirkonkristályok vizsgálatán keresztül. A cirkon kristályosodási idejének, időtartamának segítségével a Csomád vulkáni terület magmatározójának időbeli fennállására következtettünk, ami alapot adott a kristályosodás termális (hőtörténeti) modellezésre is. A Dél-Hargita kőzeteiben lévő cirkonkristályok kémiai jellege alapján a magmafejlődést, az időbeli és térbeli változásokat és a magmatározók intenzív paramétereit (hőmérséklet, oxigénfugacitás) jellemeztem. A cirkonkristályosodási idők meghatározásával alap adatokat szolgáltatam Molnár Kata doktori kutatásaihoz (konzulenseként), amelyben a Csomád vulkáni kőzeteinek kitörési korát cirkon (U-Th)/He módszerrel határozta meg. Cirkonalapú kutatásaim eredményei 9 folyóirat publikációban jelentek meg, köztük egy elsőszerzős *Earth and Planetary Science Letters* cikkben. Kutatómunkámat Magyary Zoltán Posztdoktori Ösztöndíj, 1 általam vezetett NKFIH OTKA

projekt (PD) és 1 ÚNKP Bolyai+ ösztöndíj, valamint 2, Harangi Szabolcs által vezetett NKFIH OTKA projekt (K) támogatta.

A fenti, MTA doktori rövid értekezésem témáit adó kutatások mellett számos további kutatási projektben vettem részt cirkonalapú vizsgálatokkal, geokronológiai vagy cirkon geokémiai adatértelmezéssel, így a Tisza-egység permiai Si-gazdag vulkanizmusának és gránitos magmatizmusának kormeghatározásában (Szemerédi et al., 2020, 2021, 2023), a permokarbon korú Southern Permian Basin riolitjainak petrogenetikai megismerésében (Ślodeczyk et al., 2023; 2024), valamint a Ditrói Alkáli Masszívum egyes kőzeteinek kormeghatározásában (Pál-Molnár et al., 2021).

## 2. KUTATÁSI MÓDSZEREK

Vizsgálataim többségét felszíni feltárásokban előforduló kőzetmintákból, emellett néhány esetben fúrási magokból végeztem. A kőzetek nagy részét magam vagy társszerzőimmel együtt gyűjtöttük be, míg a környező országokban előforduló piroklasztit és bentonit mintákat általában a külföldi társszerzők gyűjtötték be és küldték el nekem. A minták feldolgozását, a cirkonkinyerést minden esetben én végeztem, vagy kutatási projektjeimhez kapcsolódó technikusok az én felügyeletem alatt és útmutatásom alapján segítették e munkát. Ehhez elengedhetetlen volt, hogy kialakítsak egy megfelelő tisztaságú és felszereltségű labort az ELTE TTK FFI Kőzetan-Geokémia Tanszéken.

A beöntött és felpolírozott cirkonkristályokról katódlumineszcens (CL) képeket készítettünk az ELTE TTK FFI Kőzetan-Geokémia Tanszéken működő GATAN MiniCL detektorral ellátott AMRAY 1830 pásztázó elektronmikroszkóppal. A nagy területi felbontású (in-situ) mérési módszerek esetében a mérendő kristályokat és kristálydoméneket a CL képek alapján választottam ki. Elsősorban a legkésőbb kristályosodott, szegélyi részeket, emellett esetenként, a belsőbb és kristálymag doméneket is mértem. A csomádi kőzetekben található cirkonkristályok egy részének legkülső néhány (~4)  $\mu\text{m}$ -es kristályfelszínét is elemeztük. Ebben az esetben a kristályokat indium pogácsába nyomtam bele úgy, hogy minél nagyobb, mérhető (prizma) kristályfelszín jelenjen meg. Az in-situ kor és kémiai mérések nagy része lézeralblációs induktívcsatolású plazma tömegspektrométerrel (LA-ICP-MS) történt, amelyet az ETH Zürich (Department of Earth Sciences) laboratóriumában egy Resonetics Resolution 155 típusú lézeralblációs rendszerrel összekötött Thermo Element XR SF-ICP-MS készülékkel végeztem Marcel Guillong laborvezető felügyelete és segítsége mellett. Az

adatkértékeléseket magam végeztem az IOLITE (Paton et al., 2011; 2.5-ös verzió) szoftver segítségével. A cirkonkristályok kémiai összetételét a legtöbb esetben a kormérésekkel együtt, ugyanabból a térfogatból mértük. Az in-situ Lu-Hf izotóp elemzéseket a legtöbb esetben szintén az ETH Zürichben egy Resolution 193 nm ArF lézerablációs rendszerrel összekapcsolt Nu2 multikollektoros (MC) ICP-MS-sel végeztük az U-Pb izotópos és nyomelemkémiai méréseket követően.

Az in-situ mérések után egyes minták kiválasztott kristályain, teljescirkon CA-ID-TIMS (izotóphigítási módszer használata mellett termikus ionizációs tömegspektrométerrel kémiai abrázióval kezelt kristályokon; Triton Plus TIMS, ETH Zürich) U-Pb izotópos elemzést is végeztünk, Yannick Buret és Dawid Szymanowski közreműködésével.

A fiatal, csomádi vulkáni kőzetek cirkonkristályainak U-Th-Pb izotópos mérése ionmikroszondával történt, amit nagyrészt a Heidelberg Egyetem (HIP Lab of the Institute of Geosciences) CAMECA ims 1280-HR berendezésén Axel Schmitt segítségével magam végeztem. Az első méréseket az általunk előkészített mintákon Dunkl István a University of Los Angeles CAMECA ims 1270-as ionmikroszondájával szintén Axel Schmitt közreműködése mellett végezte.

Az in-situ LA-ICP-MS cirkon izotópos és/vagy kémiai elemzések mintáknként 30-80, összesen >6000 adat kiértékelését és értelmezését jelentették. Az ionmikroszondával végzett elemzések száma meghaladta az 500 pontot. Mind a korszámolásokat, mind a nyomelemkémiai elemzések kiértékelését matematikai módszerekkel én végeztem, amelyekhez általában az Isoplot v3.75 és v4.15 vagy az IsoplotR programokat használtam fel.

### 3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

**1. A kora-középső miocén vulkanizmus ideje a Bükkalján.** - Elsőként végeztem részletes cirkon U-Pb geokronológiai vizsgálatokat a kora-középső miocén szilíciumgazdag piroklasztitok keletkezési korának meghatározására. LA-ICP-MS módszerrel mértem in-situ cirkon U-Pb izotóparányokat és a kapott adatok feldolgozásával számítottam ki a kristályosodási korokat. Az egy mintán belüli egyedi kristályosodási koradatok értelmezése során rámutattam arra, hogy a legfiatalabb korp populáció súlyozott átlagával közelíthető legjobban a kiterés ideje, amit e módszerrel mintegy  $\pm 200$ – $300$  ezeréves (1–2%-os) bizonytalansággal lehet megadni. Az értelmezett kor bizonytalanságának számolásában figyelembe vettem négyzetes hibaterjedéssel a súlyozott átlagok bizonytalanságát és a külső

bizonytalansági tényezőket. Az így kapott eredményeket, azok megbízhatóságát CA-ID-TIMS módszerrel, illetve egy minta esetében szanidin  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  kormeghatározással ellenőriztem és erősítettem meg. Az in-situ módszerrel mért izotópadatok alapján értelmezett kitörési korok (a bizonytalanság figyelembevételével) jó egyezést mutatnak a nagy pontosságú, de költséges és hosszadalmas eljárással (cirkon CA-ID-TIMS, szanidin  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) meghatározott kitörési korokkal. Ez alátámasztja az LA-ICP-MS izotópos adatok értelmezése során alkalmazott eljárásomat a kitörési korok meghatározására. A legpontosabb kormeghatározási eredményekből a kerekítés szabályainak megfelelően egy tizedesjegyre megadva egyszerűsítettem a kitörési egységek korát és általában így hivatkozom rá.

A cirkon koradatok alapján a Bükkaljához kötődő szilíciumgazdag vulkanizmus 18,1–14,4 millió évvel ezelőtti időszakban zajlott. Ez fiatalabb és rövidebb időtartam, mint amit korábban, a K/Ar koradatok alapján értelmeztek (Márton és Pécskay, 1998). A Bükkalján megjelenő piroklasztitok cirkonalapú korrelálása alapján 8 nagyobb kitörési egységet különítettem el (l. alábbi táblázatban), amelyeken belül több kitörési alegység jelenlétére is rámutattam. A Bükkalja és környezete jelentősen tektonizált, azonban az egyes kitörési egységek jelenlegi ismereteink szerinti proximális és disztális elterjedése, megjelenése és vastagság adatai alapján legalább hat egység esetén feltételezhető, hogy azok kalderabeszakadáshoz kapcsolódó, nagy térfogatú (>10-100 km<sup>3</sup>) magma robbanásos kitöréséhez köthetők (az alábbi táblázatban vastag betűvel kiemelve).

Vulkáni kitörési egységnév	LA-ICP-MS (millió év)	CA-ID-TIMS (millió év)
<b>Wind-Kalnik (ignimbit) (Csv-2)</b>	18,2±0,3	18,099±0,022
<b>Eger (ignimbit)</b>	17,5±0,3	17,302±0,030
<b>Mangó (ignimbit)</b>	17,1±0,3	17,055±0,024
<b>Bogács</b>	16,7±0,3	16,816±0,059
Td-J egység	16,2±0,3	-
<b>Demjén (ignimbit)</b>	15,0±0,2	14,880±0,014
Tibolddaróc egység	14,7±0,2	-
<b>Harsány (ignimbit)</b>	14,3±0,2	14,361±0,016 14,358±0,015 (szanidin $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ )

Geokronológiai eredményeimmel új megvilágításba helyeztem azt a korábbi felfogást, ami három, jól elkülönülő vulkáni kulcsszintet definiált (alsó riolittufa, középső dacittufa és felső riolittufa) és módosítottam a rétegtani és kitérés korokra vonatkozó ismereteket.

Továbbá az új cirkonkorokkal pontosítottam a vulkáni működés során zajlott két jelentős kőzetblokk forgási esemény idejét, elfogadva a vulkáni képződményekhez kapcsolt paleomágneses forgási irány és nagyság publikált értékeit (pl. Márton et al., 2007). Ezek alapján az első, 50-fokos forgás 17,1 Ma és 16,8 Ma között történhetett, jóval később, mint azt korábban gondolták. A második, 30-fokos forgási esemény ideje 16,2 Ma és 14,9 Ma közötti időre esik. A Demjén kitérés egységhez sorolható (beleértve a Tar közelében előfordulókat is) képződmények nem mutattak forgást.

Kapcsolódó publikációk: Lukács et al. (2015; 2018a; 2018b); Brlek et al. (2023)

**2. Robbanásos kitérés események ideje a Tokaji-hegységben.** – A Tokaji-hegység területén számos lelőhelyről vett minták cirkon geokronológiai vizsgálatát végeztem el az első tézisben említett módon. A kitérés korokat cirkon in-situ LA-ICP-MS és CA-ID-TIMS mérések adatait kiértékelve és értelmezve határoztam meg (l. alábbi táblázatban). A kapott eredmények alapján négy riolitos robbanásos kitérés eseményt különítettem el. Ezek egyenként, ugyanahhoz a magmához kapcsolódó több, időben szorosan egymást követő (maximum néhány 100 ezer éven belüli) kitéréssorozatból állhattak. A négy elkülönített kitérés esemény közül, a fúrások alapján rekonstruálható vastagságértékeket is figyelembe véve, a Sátoraljaújhely és a Szerencs kitérések során nagy térfogatú magma jutott a felszínre (vastagon kiemelve az alábbi táblázatban). E kitérések feltehetően kalderabeszakadással jártak és jelentős kiterjedésű területet fedett be vulkáni üledék.

Vulkáni kitérés egységnev	LA-ICP-MS (millió év)	CA-ID-TIMS (millió év)
<b>Sátoraljaújhely</b>	13,1 ± 0,2	13,092 +0,019/-0,043
Hegyköz	12,3–12,6 ± 0,2	12,279 +0,016/-0,022
<b>Szerencs</b>	12,0 ± 0,2	11,954 +0,017/-0,034
Vízoly	11,6 ± 0,2	11,571 +0,017/-0,030



A 13,1 millió éves Sátoraljaújhely kitörés vezette be a térség vulkáni működését. Ez a kor fiatalabb (15,2 Ma helyett 13,1 Ma), mint amit a korábbi K/Ar koradatok alapján értelmeztek (pl. Pécskay et al. 1987; Pécskay és Molnár, 2002). Továbbá, a Tokaji-hg. vulkáni működése az új cirkonkorok alapján rövidebb (1,5-2 Myr) időszakot fogott át. Megállapítottam továbbá, hogy a 14,4 millió éves Harsány kitörési egység piroklasztitja megjelenik a Sátoraljaújhelyi egység alatt a Tokaji-hg. északnyugati előterében a Hidasnémeti, Hn-1-es fúrásban.

Kapcsolódó publikáció: Lukács et al. (2024)

**3. Litosztratigráfiai egységek definiálása és felülvizsgálata.** – Az általam meghatározott új kitörési korok, valamint a közettani tulajdonságok alapján újraértelmeztem a kora és középső miocén szilíciumgazdag robbanásos vulkáni képződmények litosztratigráfiai osztályozását a Bükkalja és Észak-Magyarország területén (Tokaji-hg., Visegrádi-hg., Börzsöny kivételével). Ez kapcsolódott a Magyarország litosztratigráfiai egységeit leíró, 2020–2022-ben folyt átfogó revideálási munkához, az ennek eredményeit tartalmazó kötetek (Babinszki et al., 2023a; 2023b) szerkesztésében a Magyar Rétegtani Albizottság (MRB) Magmás és Metamorf Munkabizottság elnökeként aktívan részt vettem. A litosztratigráfiai egységek nevében követtem a Nemzetközi Rétegtani Útmutató irányadó javaslatait, valamint elfogadtam az MRB azon törekvését, hogy a litosztratigráfiai rendszert, ahol lehet, egyszerűsítsük. A rendelkezésre álló tudományos eredmények alapján négy, litológiai jellemzők alapján elkülöníthető, szilíciumgazdag vulkáni működéshez kapcsolódó litosztratigráfiai egységet definiáltam, illetve a korábbi leírásokat revideáltam és javasoltam az MRB-nek elfogadásra: (1) Tihaméri Riolit Lapillitufa Formáció (korábban Gyulakeszi Riolitufa Formáció); (2) Bogácsi Dácit Lapillitufa Formáció (korábban Tar Dácitufa Formáció); (3) Tari Dácit Lapillitufa Formáció; (4) Harsányi Riolit Lapillitufa Formáció. Ezek közül három (1, 3, 4) formáció esetében regionális, észak-magyarországi elterjedés mutatható ki. A javasolt formációk mindegyike több vulkáni kitörést és kitörési egységet foglal(hat) magába, amelyek a későbbi kutatómunkák eredményei alapján akár további kitörési, illetve litosztratigráfiai alegységre bonthatók. Mindegyik litosztratigráfiai egység esetében az akkor elérhető tudományos eredmények alapján újradefiniáltuk a beletartozó vulkáni előfordulásokat és megadtuk részletes, az ISG szempontoknak megfelelő leírásukat. Kutatási eredményeim

segítették a Tokaji-hegység vulkáni képződményeinek litosztratigráfiai besorolását is.

Kapcsolódó publikációk: Lukács et al. (2022); Selmeczi et al. (2023)

#### **4. Nyomelem-összetétel adatok értelmezése**

**4a. Cirkon és kőzetüveg nyomelem-összetétel adatok** – A cirkonkristályok U-Pb izotóparányai mellett, ugyanabból a gerjesztett térfogatból mértem nyomelem összetételt is. A Pannon-medence minden elkülönített miocén szilíciumgazdag piroklasztit egységének meghatároztam a jellemző cirkon nyomelem-összetételét. Rámutattam arra, hogy a főbb kitérésű egységek elkülöníthetők cirkon nyomelem-összetételük alapján, amit sokváltozós matematikai módszerrel is alátámasztottam. Az összetételbeli különbség elsősorban a Hf, Y, U, Nb, valamint az Yb/Dy, Th/U és Eu/Eu\* értékekben van. A nyomelem-összetételbeli eltérés a szilíciumgazdag magmák eltérő fejlődésével magyarázható. A nyomelem-koncentrációbeli különbséget a kristályosodási folyamatban résztvevő eltérő fázisok (pl. amfibol, allanit, földpátok), a differenciáció mértéke és a kristályosodás körülményei (pl. oxidációs környezet) okozzák. Kimutattam, hogy a Bükkalja, illetve a Tokaji-hegység szilíciumgazdag kitérésű egységei jellemzően eltérő cirkon nyomelem-összetételt mutatnak. Ez alapvetően a magmafejlődés különböző oxidációs környezetével (oxidatív, illetve redukív) és a magmák eltérő víztartalmával magyarázható.

A vizsgált kitérésű egységek többsége kristályszegény, azaz olvadékban gazdag magmatározó részből származtak. Az olvadékok nyomelem-összetételét üde kőzetüveg-szilánkokon in-situ LA-ICP-MS elemzéssel határoztuk meg (Harangi et al., 2005; Lukács et al., 2024). Megállapítottam, hogy a cirkon koradatok alapján elkülönített kitérésű egységek kőzetüveg nyomelem-összetételben is különböznek mind a Bükkalja, mind a Tokaji-hegység területén. A Szerencs, a Demjén és a Harsány egységek esetében a kitérésű tápláló magmák összetétele bimodális, ami azzal magyarázható, hogy a magmatározóban kis mértékben különböző, egymástól elkülönült olvadéklencsék alakultak ki. Más esetekben egy területről származó, homogén összetételű kristályszegény olvadéktömeg tört a felszínre. A Tokaji-hegység riolitos magmái extrém differenciációt mutatnak, ezek közül a Szerencs kitérésű kőzetolvadéka különösen fejlett, amihez hasonló, a publikált adatok alapján, csak néhány riolit-előfordulás esetében tapasztalható (pl. Glass Mt. és Bishop Tuff, Long Valley, valamint Huckleberry Ridge Tuff, Yellowstone).

A kőzetüveg nyomelem-összetétel adatai összhangban vannak a cirkonkristályok nyomelem-összetétel adataival. Ez utóbbiak tehát tükrözik a kitérő magma jellegzetességét és egyedüli fázisként információt nyújtanak akkor, amikor a vulkáni anyag, a benne lévő kőzetüveg és a fő kristályfázisok már teljesen átalakultak. Az elsődleges magma összetételbeli tulajdonsága ebben az esetben csak az ellenálló cirkonkristályok alapján határozható meg (pl. Segvić et al., 2023; Bercea et al., 2023).

**4b. Cirkon/olvadék megoszlási együttható értékek meghatározása** – A Bükkalja kőzetei közül azokban az esetekben, ahol cirkon és kőzetüveg nyomelem-összetétel adatai rendelkezésre álltak, továbbá a fázisok kémiai egyensúlya alátámasztható volt, nyomelem megoszlási együttható értékeket számítottam. Ehhez az adott kitérési egység mintáiban lévő cirkonkristályok külső szegélyének és a kapcsolódó kőzetüveg szilánkok homogén nyomelem adatainak átlagait használtam fel. Rámutattam arra, hogy metalumíniumos-gyengén peralumíniumos dácit-riolit magmák esetében, a szolidusz közeli hőmérsékleten lévő nagy SiO<sub>2</sub>-tartalmú (> 70 m/m%) olvadékösszetétel már nem befolyásolja jelentősen a megoszlási együttható értékeket. Ezek a megoszlási együttható adatok felhasználhatók a kitérő magma olvadékösszetétel meghatározására abban az esetben, amikor a vulkáni képződmény teljesen átalakult és csak a cirkon nyomelemtartalma őrzi az eredeti magmás jellegét.

Kapcsolódó publikációk: Lukács et al. (2015; 2018a; 2021a; 2024)

**5. Cirkon in-situ Hf izotóp adatok meghatározása és értelmezése.** – A Bükkalja és a Tokaji-hegység területén elkülönített piroklasztit egységekben lévő cirkonkristályoknak meghatároztam az in-situ <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf izotóposztételét és a koradatok alapján εHf értékeket számoltam. Az εHf értékek széles tartományban mozognak -14 és +4 között. Ez arra utal, hogy a riolitos magmák keletkezésében földköpeny- és földkéreg-eredetű magmák is részt vettek, azonban különböző mértékben. Az elkülönített kitérési egységeknek jellemző és egymástól különböző εHf értékei vannak. A Hf izotópadatok, a korábban tárgyalt geokémiai és koradatok mellett, további robusztus segítséget nyújtanak az egymástól távol eső piroklasztit minták korrelálásához. Figyelemre méltó, hogy a Bükkalja és a Tokaj esetében is a fiatalabb egységek (Demjén és Harsány, illetve Szerencs és Vizsoly) nagyobb εHf értékkel jellemezhetők, ami növekvő földköpeny-eredetű magma részvételét jelzi a magmafejlődésben. Ez összhangban lehet a

magmaképződés okával, miszerint a szilíciumgazdag vulkanizmus a Pannon-medence litoszféra elvékonyodásával egy időben történt. A cirkon  $\epsilon\text{Hf}$  értékek növekedése jelezheti azt, hogy a litoszféra elvékonyodásával egyre nagyobb szerep jutott a földképeny eredetű, ezen belül vélelmezhetően az asztenoszféra eredetű magmáknak. A bazaltos magmákból frakcionációs kristályosodással jöttek létre a fejlett,  $\text{SiO}_2$ -ben gazdagabb olvadékok, amelyek a felső földkéregben fokozatosan alakították ki a nagy térfogatú magmatározókat. A Bükkalja szilíciumgazdag vulkanizmusa kontinentális kőzetlemezen belüli tektonikai helyzetben történt, míg a Tokaji-hegység szilíciumgazdag vulkáni működése egy speciális geodinamikai környezetben, a szubdukciós zónához közelebb, a kőzetlemez alábukás végső, leszakadási esemény előtti helyzetben zajlott.

Kapcsolódó publikációk: Lukács et al. (2018a; 2024); Brlek et al. (2023)

**6. Cirkon ujjlenyomat-alapú tefrakorrelációs módszer, regionális korreláció, a vulkánkitörések nagysága.** – Ráműtöttem arra, hogy cirkonkristályok U-Pb koradatai, nyomelem és/vagy Hf-izotóp összetétele hatékonyan használható egymástól térben elszakított vulkáni képződmények korrelálásához, amennyiben a kitöréseket eltérő összetételű magma táplálta. Kutatási eredményeim alapján a Pannon-medence miocén szilíciumgazdag vulkanizmusát kis mértékben eltérő összetételű magmák okozták. Ez lehetőséget adott a távoli, disztális vulkáni kőzet-előfordulásoknak a kitörési központhoz közeli, proximális képződményekhez való kapcsolására. Több vulkáni képződményt vizsgáltam Észak-Magyarország területén, amelyek mindegyike összevonható volt a Bükkalján elkülönített fő kitörési egységekkel. Ezek közül az Ipolytarnócon megjelenő piroklasztitok a 17,3 Ma éves Eger kitörési egységgel kapcsolhatók össze, míg a Nemti közelében lévő vulkáni képződmény a kicsivel fiatalabb, 17,1 Ma éves Mangó kitörési egység része. A Tar, Fehérkő kőfejtő és a Gömör-hegy piroklasztitja a Demjén kitörési egységgel vonható össze. A Szilvásvár és Szentkút, Vadászgödörben lévő piroklasztitok a 14,4 Ma Harsány kitörési egység részei. A Lénárdaróc mellett megjelenő akkréciós lapilli-gazdag piroklaszt-ár üledékek a 13,1 Ma Sátoraljaújhely kitörési egységhez tartoznak. Ez utóbbi alátámaszthatja a nagy térfogatú magma felszínre törését, vélhetően kalderaformáló kitörését, amely esetben a kapcsolódó piroklaszt-árak akár 100 kilométer távolságba is eljuthattak.

A kidolgozott cirkon ujjlenyomat-módszer hatékonysága számos nemzetközi együttműködést indított el. A környező országok szakembereivel végzett

közös kutatások, amelyekben cirkon geokronológiai és geokémiai, valamint értelmezési munkát végeztem, több fontos eredményt hozott. Sikerült számos környező és távolabbi országban előforduló miocén vulkáni képződményt korrelálni a Pannon-medencében, Bükkalja területén elkülönített proximális kitörési egységekkel (Lukács et al., 2018a) és ezek alapján következtetni lehetett a vulkánkitörések nagyságára. Rámutattunk arra, hogy a (Bükkaljától jelenleg 350 km-re lévő) horvátországi Kalnik miocén vulkáni képződményei a bükkaljai 17,3 Ma és 18,1 Ma kitörések képződményei, azaz a piroklasztárak messze, akár több mint 100 kilométer távolságba is eljuthattak. Ilyet csak a legnagyobb, több száz köbkilométer mennyiségű magma felszínre törésével járó kitörések esetében írtak le. A szintén horvát Medvednica piroklasztitainak kora  $14,937 \pm 0,012$  Ma és  $14,835 \pm 0,012$  Ma, ami közül az előbbi a demjéni kitörés anyaga lehet. Meghatároztam a Bécsi-medence St. Georgen tufa keletkezési idejét, a  $14,6 \pm 0,2$  Ma kor kijelöli a középső Paratethys egyik jelentős transzgressziós eseményének kezdeti idejét. A cirkon kémiai ujjlenyomat alapján ez a szint a Harsány (vagy Tibolddaróc) kitörési egységgel párhuzamosítható. A Kárpát-kanyarban lévő Bättráni Tufa kora cirkon U-Pb mérési eredményeim alapján  $17,4 \pm 0,2$  Ma. Figyelembe véve a cirkon nyomelemadatokat is, ez az Eger kitörési egységgel korrelálható. A Nördlingen Ries becsapódási kráterben felhalmozódott üledékben lévő vulkáni réteg kora cirkon vizsgálatom alapján  $14,2 \pm 0,2$  Ma, feltehetően a harsányi kitörés anyaga.

A vulkánkitörési egységek képződményeinek regionális elterjedése és a fúrásadatok feldolgozása alapján következtettem arra, hogy Európa legnagyobb vulkánkitörései az elmúlt 20 millió évben a Pannon-medencében történtek. Összességében több mint  $4000 \text{ km}^3$  vulkáni anyag került a felszínre a 18,1 és 14,4 millió év között zajlott vulkáni működés során. Ezen belül a 18,1 Ma Wind–Kalnik, a 17,3 Ma Eger, a 14,9 Ma Demjén és a 14,4 Ma Harsány kitörések egyenként vélhetően több száz köbkilométer vulkáni anyagot szolgáltathattak a tefra elterjedése és más nagy vulkánkitörésekkel (pl. Bishop, USA és Oruanui, Új-Zéland) való összevetés alapján. Ezek a nagy robbanásos vulkáni működések Európa jelentős részét boríthatták be vulkáni hamuanyaggal, amelyek nagyobb vastagságban halmozódtak fel és őrződtek meg a mélyebb Paratethys üledékgyűjtőkben. Mindezek alapján rámutattam arra, hogy e vulkáni képződmények kulcsszerepet játszhatnak a Mediterrán-térségben lévő Paratethys rétegsorok kronosztratigráfiai keretbe foglalásában.

Kapcsolódó publikációk: Lukács et al. (2018a; 2021a; 2022; 2024); Arp et al. (2021); Bercea et al., (2023); Brlek et al. (2023); Šegvić et al. (2023); Trinajstić et al. (2023)

**7. Szilíciumgazdag magmatározók.** – Az in-situ cirkon U-Pb izotópadatokból számolt korok az ásványfázis vizsgált területének kristályosodási korát adja meg. Nagyszámú, célzott kristályterületi/térfogati felbontással végzett mérés esetében következtethetünk arra, hogy milyen hosszan történt a cirkonkristályok képződése, más szóval, mennyi időn keresztül volt olvadék, milyen hosszú ideig volt aktív a magmatározó a földkéregben. A bükkaljai szilíciumgazdag vulkáni képződmények vizsgálata során kapott eredményeim azt mutatják, hogy a magmatározók a nagy vulkánkitörések előtt akár 300–700 ezer évig, míg a Tokaji-hg. piroklasztitjai esetében minimum 46–265 ezer évig épültek és léteztek a földkéreg felső részén. Ezen időszakok alatt a magmatározók valamely részén folyamatosan fennállt a cirkonkristályosodás feltétele, azaz volt olvadék. Az egyes vulkánkitöréseket okozó magmák/olvadékok kémiai jellege eltérő, azaz egy időben kismértékben eltérő összetételű riolitos, riódácitos magmák léteztek egymás közelében. Amennyiben a kontinentális vulkanizmusra vonatkozó átlagos ~1:10 vulkáni/plutoni térfogataránnyal számolunk (White et al. 2006), akkor a földkéregben a kora és középső miocénben, olykor ugyanabban az időben, több ezer köbkilométer térfogatú magmatestek lehettek. Az összességében több mint 4000 köbkilométer mennyiségű vulkáni anyag esetén 18,1–14,4 millió éve minimálisan 40 ezer köbkilométer magmát feltételezhetünk a földkéregben. E fejlett magmák létrejöttéhez legalább kétszeres mennyiségű bazaltos magmamennyiségnek kellett lennie az alsókéregben, illetve a földkéreg-földköpeny határon. A mafikus magmák mennyisége tehát elérhette a 100 ezer köbkilométert. Ezek a térfogatértékek nagyságrendileg összhangban vannak a jelenlegi szilíciumgazdag magmás rendszerekre (pl. Középső-Andok, Yellowstone) számolt értékekkel. A szilíciumgazdag vulkanizmust tápláló magmatározók felső földkéregbeli kialakulásához jelentős felfűtésnek kellett történnie, ami megemelte a ridegképlékeny tulajdonság határfelületét. A képlékeny tulajdonságú földkéreg ugyanis nagyobb határfokkal tudja befogadni a nagy térfogatú magmatömeget. A földkéreg felfűtése részben az alsókéregbe nyomuló jelentős bazaltos magmatömeeggel, részben a felső földkéregtet is érintő, pl. a 19 millió évvel ezelőtti andezit-dácitos vulkanizmussal (pl. Paks környéke) magyarázható.

Kapcsolódó publikációk: Lukács et al. (2015; 2018a; 2024)

## 8. A Dél-Hargita vulkanizmusa

**8a. A Csomád magmatározó rendszere** – A Csomád pleisztocén vulkáni képződményeiből >1000 cirkon kristálydomén in-situ U-Pb, U-Th és nyomelem elemzését és/vagy kiértékelését végeztem el. Az egyedi cirkonkristályok U-Pb és U-Th izotópos adataiból meghatároztam a kristályosodási korokat. Eredményeim megalapozták, hogy kiszámítsuk a vulkáni kitörések idejére utaló cirkon (U-Th)/He korokat és felállítsunk egy részletes kitérés kronológiát (Molnár et al., 2018; 2019). Vizsgáltam a cirkonkristályok belső részeit, e mellett pedig elemeztem a legkülső prizmalap területeket, azaz a legutoljára kialakult zónákat. Rámutattam arra, hogy mind a kristálybelső, mind a legkülső kristálylap korok jelentős, több százezer éves időintervallumot fognak át, akár egyetlen kitérés eseményhez kapcsolt vulkáni képződmények esetében is. Egyes cirkonkristályok belső és külső része között több mint 150 ezer év keletkezési időt mutattam ki.

Az egyedi kristályosodási korok lehetővé tették, hogy következtessék a vulkáni terület alatt lévő magmatározó fennállási idejére, összetételbeli és hőtörténetbeli változására. A cirkonkristályok titán koncentrációja és a befogadó olvadékösszetétel alapján kristályosodási és Zr-telítettségi hőmérsékletet számoltam. A hőmérséklet adatok 780 és 670 °C (szolidusz közeli hőmérséklet) között vannak. Megállapítottam, hogy a magmatározó hőmérséklete idővel átlagosan csökkent, az idősebb Csomád (1000–350 ka) esetében 680–780 °C, a fiatal Csomád (160–30 ka) esetében 670–740 °C. Ez a magmatározó növekedési és érési folyamatát mutatja. Eredményeim alapján megállapítható, hogy a vulkáni terület alatti magmatározók jóval több, mint 300 ezer évvel a vulkáni működés előtt már kialakultak és a magmatest folyamatos, 670–780 °C közötti hőmérsékleten, azaz szolidusz feletti kristálykása-állapotban fennállhatott. A Csomád vulkáni dóm terület teljes, 1 millió éves fennállását tekintve, az alatta lévő magmatározó rendszer legalább 500 ezer évvel korábban kezdett kialakulni.

A hosszú időn keresztül létező magmatározóhoz rendszeresen érkező magmabenyomulások szükségesek. A cirkonkristályosodási időkre alapozott modellszámításaink szerint 2 millió éven keresztül átlagosan  $1,3 \times 10^{-4}$  km<sup>3</sup>/év magmafluxus kell ehhez. Bár a magmatározó rendszer egyes részei megszilárdulhattak, mindig volt azonban olyan része, amelyben elegendő olvadék volt jelen ahhoz, hogy a szakaszos magmabenyomulások a magmatározó reaktivációjához és esetenként vulkánkitöréshez vezessenek. A vulkáni/plutoni arányt a Csomád esetében 1:25–1:30 arányban határoztuk

meg, azaz jelentősebb a mélyben felhalmozódott magmás anyag az átlagos (1:10, White et al, 2006) értékhez képest. A kapott magmafluxus értékkel számolva 2 millió év alatt a földkéregbe ~260 km<sup>3</sup> magma nyomulhatott be, amelyből 160 ezer évvel ezelőttre ~35 km<sup>3</sup> szolidusz hőmérséklet feletti (>670 °C) magma állhatott össze, amiből ~6 km<sup>3</sup> lehetett kitörésre képes (>50% olvadékfrakciót tartalmazott, >800 °C-os). Ez összhangban van a Csomád 4. kitörési epochában (160–90 ezer év között) felszínre került magma térfogatával (4–5 km<sup>3</sup>). Eredményeink először mutattak rá arra, hogy hosszú inaktív időkkel jellemezhető vulkáni területek alatt is fennállhat folyamatosan földkéregbeli magmatározó és ez lehetőséget adhat kitörésre képes magma összeállására, ami vulkáni kitöréshez vezethet.

**8b. A Dél-Hargita vulkanizmusának változása** – A Dél-Hargita pliocén–kvarter vulkáni működésében jelentős magmaösszetételbeli változások voltak. Cirkon U-Pb koradataim hozzájárultak ahhoz, hogy a kitörési központoktól távoli törmelékklavina képződmények vulkáni kapcsolatát megtaláljuk, illetve pontosítsuk a magmaösszetétel változási eseményeknek idejét. Az első váltás mintegy 2 millió évvel ezelőtt, a második pedig 1 millió évvel ezelőtt történt. Cirkon nyomelem-összetétel adatokkal rámutattam arra, hogy ez utóbbi magmaösszetétel váltást követően oxidáltabb és vízben gazdagabb kőzetolvadék nyomult a földkéregbe és okozta a vulkánkitöréseket. Ezt a következtetést további ásványfázis-összetétel és termobarometriai számolásokkal is igazoltuk.

Kapcsolódó publikációk: Cserép et al. (2023); Harangi et al. (2015); Lukács et al. (2018c; 2021b); Seghedi et al. (2023)

## 4. IRODALOMJEGYZÉK

### *A tézisek alapjául szolgáló publikációk (PhD fokozatszerzés óta)*

Brek, M; Tapste, RS; Schindlbeck-Belo, J; Gaynor, SP; Kutterolf, S; Hauff, F; Georgiev, SV; Trinajstić, N; Šuica, S; Brčić, V; Wang, KL; Lee, HY; Beier, C; Abersteiner, AB; Mišur, I; Peytcheva, I; Kukoč, D; Németh, B; Trajanova, M; Balen, D; Guillong, M; Szymanowski, D; **Lukács, R** (2023): Tracing widespread Early Miocene ignimbrite eruptions and petrogenesis at the onset of the Carpathian-Pannonian Region silicic volcanism. Gondwana Research 116 pp. 40-60. 21 p.



- Harangi, Sz; **Lukács, R**; Schmitt, AK; Dunkl, I; Molnár, K; Kiss, B; Seghedi, I; Novothny, Á; Molnár, M (2015): Constraints on the timing of Quaternary volcanism and duration of magma residence at Ciomadul volcano, east–central Europe, from combined U–Th/He and U–Th zircon geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301 pp. 66-80., 15 p.
- Lukács, R**, Harangi, S; Bachmann, O; Guillong, M; Daniščík, M; Buret, Y; von Quadt, A; Dunkl, I; Fodor, L; Sliwinski, J, Soós, I (2015): Zircon geochronology and geochemistry to constrain the youngest eruption events and magma evolution of the Mid-Miocene ignimbrite flare-up in the Pannonian Basin, eastern central Europe. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 170: 5-6 Paper: 52, 26 p.
- Lukács, R**; Harangi, Sz; Guillong, M; Bachmann, O; Fodor, L; Buret, Y; Dunkl, I; Sliwinski, J; von Quadt, A; Peytcheva, I; Zimmerer, M (2018a): Early to Mid-Miocene syn-extensional massive silicic volcanism in the Pannonian Basin (East-Central Europe): Eruption chronology, correlation potential and geodynamic implications. *Earth-Science Reviews* 179 pp. 1-19., 19 p.
- Lukács, R**; Guillong, M; Bachmann, O; Fodor, L; Harangi, Sz (2021a): Tephrostratigraphy and magma evolution based on combined Zircon trace element and U-Pb age data: fingerprinting Miocene silicic pyroclastic rocks in the Pannonian Basin. *Frontiers in Earth Science* 9 Paper: 615768, 20 p.
- Lukács, R**; Caricchi, L; Schmitt, A K; Bachmann, O; Karakas, O; Guillong, M; Molnár, K; Seghedi, I; Harangi, Sz (2021b): Zircon geochronology suggests a long-living and active magmatic system beneath the Ciomadul volcanic dome field (Eastern-Central Europe). *Earth and Planetary Science Letters* 565 Paper: 116965, 12 p.
- Lukács, R**; Harangi, Sz; Gál, P; Szepesi, J; Di Capua, A; Norini, G; Sulpizio, R; Groppelli, G; Fodor, L (2022): Formal definition and description of lithostratigraphic units related to the Miocene silicic pyroclastic rocks outcropping in Northern Hungary: a revision *Geologica Carpathica* 73 : 2 pp. 137-158., 22 p.
- Seghedi, I; **Lukács, R**; Soós, I; Guillong, M; Bachmann, O; Cserép, B; Harangi, Sz (2023): Magma evolution in a complex geodynamic setting, South Harghita volcanic area, East-Central Europe: Constraints from magma compositions and zircon petrochronology. *Lithos* 442-443 Paper: 107059

**Lukács, R;** Guillong, M; Szepesi, J; Szymanowski, D; Portnyagin, M; Józsa, S; Bachmann O; Petrelli, M; Müller, S; Schiller, D; Fodor, L; Chelle-Michou, C; Harangi, Sz (2024): Mid-Miocene silicic explosive volcanism of the Tokaj Mts., eastern-central Europe: eruption chronology, geochemical fingerprints and petrogenesis. *Gondwana Research* 130, pp. 53-77

*Az értekezés témaköréhez és a tézisekhez kapcsolódó további publikációk (PhD fokozatszerzés óta)*

Arp, G; Dunkl, I; Jung, D; Karius, V; **Lukács, R;** Zeng, L; Reimer, A, Head, JW (2021): A Volcanic Ash Layer in the Nördlinger Ries Impact Structure (Miocene, Germany): Indication of Crater Fill Geometry and Origins of Long-Term Crater Floor Sagging. *Journal of Geophysical Research: Planets* 126: 4 Paper: e2020JE006764

Bercea, RI; Balç, R; Tamas, A; Filipescu, S; Tamas, DM; Guillong, M; Szekely, SzF; **Lukács, R** (2023): Insights into the palaeoenvironments, structure and stratigraphy of the lower Miocene of the Eastern Carpathians Bend Zone, Romania. *Geological Quarterly* 67: 1 Paper: 2, 37 p.

Cserép, B; Szemerédi, M; Harangi, Sz; Erdmann, S; Bachmann, O; Dunkl, I; Seghedi, I; Mészáros, K; Kovács, Z; Virág, A; Ntaflos, T; Schiller, D; Molnár, K; **Lukács R** (2023): Constraints on the pre-eruptive magma storage conditions and magma evolution of the 56–30 ka explosive volcanism of Ciomadul (East Carpathians, Romania). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 178: 12 Paper: 96, 31 p.

**Lukács, R;** Guillong, M; Sliwinski, J; Dunkl, I; Bachmann, O; Harangi, Sz (2018b): LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology data of the Early to Mid-Miocene syn-extensional massive silicic volcanism in the Pannonian Basin (East-Central Europe). *Data in Brief* 19 pp. 506-513., 8 p.

**Lukács, R;** Guillong, M; Schmitt, AK; Molnár, K; Bachmann, O; Harangi, Sz (2018c): LA-ICP-MS and SIMS U-Pb and U-Th zircon geochronological data of Late Pleistocene lava domes of the Ciomadul Volcanic Dome Complex (Eastern Carpathians). *Data in Brief* 18 pp. 808-813., 6 p.

Molnár, K; Harangi, S; **Lukacs, R;** Dunkl, I; Schmitt, AK; Kiss, B; Garamhegyi, T; Seghedi, I (2018): The onset of the volcanism in the Ciomadul Volcanic Dome Complex (Eastern Carpathians): Eruption

- chronology and magma type variation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 354 pp. 39-56., 18 p.
- Molnár, K; **Lukács, R**; Dunkl, I; Schmitt, A K.; Kiss, B; Seghedi, I; Szepesi, J; Harangi, Sz (2019): Episodes of dormancy and eruption of the Late Pleistocene Ciomadul volcanic complex (Eastern Carpathians, Romania) constrained by zircon geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 373 pp. 133-147., 15 p.
- Šegvić, B; **Lukács, R**; Mandić, O; Strauss, P; Badurina, L; Guillong, M; Harzhauser, M (2023): U-Pb zircon age and mineralogy of St. Georgen halloysite tuff shed light on the timing of the middle Badenian (mid-Langhian) transgression, ash dispersal, and paleoenvironmental conditions in the southern Vienna Basin, Austria. *Journal of the Geological Society* 180: 2 Paper: jgs2022-106
- Trinajstić, N; Brlek, M; Gaynor, SP; Schindlbeck-Belo, J; Šuica, S; Avanić, R; Kutterolf, S; Wang, KL; Lee, HY; Holcová, K; Kopecká, J; Baranyi, V; Hajek-Tadesse, V; Bakrač, K; Brčić, V; Kukoč, D; Milošević, M; Mišur, I; **Lukács, R** (2023): Provenance and depositional environment of Middle Miocene silicic volcanoclastic deposits from Mt. Medvednica (North Croatian Basin, Carpathian-Pannonian Region). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 443 Paper: 107917

***További hivatkozott irodalmak (a téziseket bizonyító publikációk nélkül)***

- Aspinall, W. P., Auken, M., Hincks, T., Mahony, S., Nadim, F., Pooley, J., Sparks, S., Syre, E. (2011): Volcanic hazard and risk in GDRFF priority countries. NGI report 20100806, May. <http://www.globalvolcanomodel.org>.
- Babinszki, E., Piros, O; Budai, T., Gyalog, L., Halász, A., Király, E., Koroknai, B., Lukács, R., M Tóth, T. (Ed.), 2023a. Magyarország litosztatigráfiai egységeinek leírása I.: Prekainozoos képződmények. Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest, Magyarország, 275 p.
- Babinszki, E., Piros, O; Csillag, G; Fodor, L; Gyalog, L; Kerescmár, Zs; Less, György; Lukács, R; Sebe, K; Selmeczi, I; Szepesi, J; Sztanó, O (Ed.), 2023b. Magyarország litosztatigráfiai egységeinek leírása II.: Kainozoos képződmények Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest, Magyarország, 179 p.
- Bachmann, O., Huber, C.: The Inner Workings of Crustal Distillation Columns; the Physical Mechanisms and Rates Controlling Phase Separation in Silicic Magma Reservoirs, *Journal of Petrology*, Volume 60, Issue 1, January 2019, Pages 3–18

- Balázs, A., Mañenco, L., Magyar, I., Horváth, F., and Cloetingh, S. (2016). The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: new genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin. *Tectonics* 35 (6), 1526–1559.
- Blundy, J., and Wood, B. (1994). Prediction of crystal–melt partition coefficients from elastic moduli. *Nature* 372 (6505), 452–454.
- Blundy, J., and Wood, B. (2003). Mineral-melt partitioning of uranium, thorium and their daughters. *Rev. Mineral. Geochem.* 52 (1), 59–123.
- Cooper, K. M. (2019): Time scales and temperatures of crystal storage in magma reservoirs: implications for magma reservoir dynamics. *Phil. Trans. R. Soc. A*.3772018000920180009
- Edmonds, M., Cashman, K. V., Holness, M., Jackson, M. (2019): Architecture and dynamics of magma reservoirs. *Phil. Trans. R. Soc. A*.3772018029820180298
- Harangi, Sz., Mason, P. R. D., and Lukács, R. (2005). Correlation and petrogenesis of silicic pyroclastic rocks in the Northern Pannonian Basin, Eastern-Central Europe: in situ trace element data of glass shards and mineral chemical constraints. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 143 (4), 237–257.
- Márton, E., and Pécskay, Z. (1998). Complex evaluation of paleomagnetic and K/Ar isotope data of the miocene ignimbritic volcanics in the Bükk Foreland, Hungary. *Acta Geol. Hung.* 41 (4), 467–476.
- Márton E., Zelenka T., Márton P. (2007): Paleomagnetic correlation of Miocene pyroclastics of the Bükk Mts and their forelands. *Central European Geology* 50, 47–57.
- Pál-Molnár, E; Kiri, L; Lukács, R; Dunkl, I; Batki, A; Szemerédi, M; Almási, EE; Sogrik, E; Harangi, Sz (2021): Timing of magmatism of the Ditrău Alkaline Massif, Romania – A review based on new U–Pb and K/Ar data. *Central European Geology* 64: 1 pp. 18-37., 15 p.
- Papale, P. (2018): Global time-size distribution of volcanic eruptions on Earth. *Scientific Reports* 8, 6838
- Papale, P., Marzocchi, W., Garg, D. (2021): Global volume distribution for subaerial volcanism on Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB021763.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., and Hergt, J. (2011). Iolite: freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *J. Anal. At. Spectrom.* 26 (12), 2508–2518.

- Pécskay, Z., Balogh, K., Székyné, F.V., Gyarmati, P. (1987): A Tokaji-hegység miocén vulkánosságának K/Ar geokronológiája. *Földt. Közl.* 117, 237–253.
- Pécskay, Z., Molnár, F. (2002): Relationships between volcanism and hydrothermal activity in the Tokaj Mountains, Northeast Hungary, based on K-Ar ages. *Geol. Carpath.* 53, 303–314.
- Selmeczi, I.F., Lukács, R; Szepesi, J; Sebe, K; Prakfalvi, P; Sztanó, O; Nagymarosy, A., Szentpétery, I, Less, Gy, et al. 2023. Neogén: Alsó és középső miocén, in: Babinszki, E.P., O; Csillag, G; Fodor, L; Gyalog, L; Kerckmár, Zs; Less, György; Lukács, R; Sebe, K; Selmeczi, I; Szepesi, J; Sztanó, O (Ed.), Magyarország litosztratigráfiai egységeinek leírása II.: Kainozoos képződmények Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest, Magyarország, pp. 52-116.
- Ślodziak, E; Przybyło, A; Pietranik, A; Lukács, R (2023): Diverse magma evolution recorded in trace element composition of zircon from Permian-Carboniferous rhyolites (NE German Basin, NW Polish Basin). *International Journal of Earth Sciences* 112, 2205-2222.
- Ślodziak, E; Pietranik, A; Repstock, A; Przybyło, A; Glynn, S; Lukács, R (2024): Zircon trace element fingerprint of changing tectonic regimes in Permian rhyolites from the Central European Lowlands. *International Journal of Earth Sciences* 113, 779-795.
- Sparks R. S. J., Annen C., Blundy J. D., Cashman K. V., Rust A. C., Jackson M. D. (2019): Formation and dynamics of magma reservoirs. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377:2018001920180019
- Szemerédi, M; Lukács, R; Varga, A; Dunkl, I; Józsa, S; Tatu, M; Pál-Molnár, E; Szepesi, J; Guillong, M; Szakmány, Gy; Harangi, Sz (2020): Permian felsic volcanic rocks in the Pannonian Basin (Hungary): new petrographic, geochemical, and geochronological results. *International Journal of Earth Sciences* 109: 1 pp. 101-125., 25 p.
- Szemerédi, M; Varga, A; Lukács, R; Dunkl, I; Seghedi, I; Tatu, M; Kovács, Z; Raucsik, B; Benkó, Zs; Harangi, Sz; Pál-Molnár, E (2023): Large-volume Permian felsic volcanism in the Tisza Mega-unit (East-Central Europe): Evidence from mineralogy, petrology, geochemistry, and geochronology. *Lithos* 456-457 Paper: 107330, 21 p.
- Szemerédi, M.; Varga, A.; Dunkl, I.; Lukács, R.; Seghedi, I.; Kovács, Z.; Raucsik, B.; Pál-Molnár, E (2021): Petrology and zircon U–Pb dating of granitoid rocks in the Highiş massif (SW Apuseni Mts., Romania): Insights into Permian plutonic–volcanic connections. *Geologica Carpathica* 72: 6 pp. 482-504., 23 p.

- White, S.M., Crisp, J.A., Spera, F.J (2006): Long-term volumetric eruption rates and magma budgets. *Geochem. Geophys. Geosyst.*7, Q03010.
- Wilson, C.J.N., Cooper, G.F., Chamberlain, K.J., Barker, S.J., Myers, M.L., Illsley-Kemp, F., Farrell, J. (2021): No single model for supersized eruptions and their magma bodies. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2, 610–627.