

ban és hatékonyabban közvetíthetnek a jeleket. A fotonkristályokkal, amelyeknek fényáteresztő képessége a rácson belül helyről helyre szabályozható, ez az álom megvalósítható. A fotonkristályokban a szórt fotonhullámok úgy interferálnak egymással, hogy bizonyos fotonenergiák tiltott sávba kerülnek – ahogy az előbb utaltunk rá –, azaz bizonyos frekvenciájú fotonokat nem engednek át. Ha az egyébként tökéletes fotonkristályba például egy vonalhibát visznek be, akkor a kristály már úgy működik, mint egy hullámvezető: a vonalhiba mentén az egyébként tiltott frekvenciájú fotonok is terjedhetnek. Ilyen, viszonylag egyszerűen gyártható és hangolható fotonkristály az *inverz opál*, amelyben a tiltott sáv helyzete és szélessége kívülről szabályozható. Az inverz opál valójában egy légbuborékokból álló kristály, amelynek teljes térfogatát 75 százalékban levegő tölti ki. A buborékokat magába záró szilíciumváz belső felületei folyadékkristállyal vannak bevonva, amelynek fényáteresztő képessége külső elektromos térrel szabályozható. A légbuborékok (amelyek mintegy csapdába ejtik a fényt) ezzel mikroszkopikus kapcsolóként működtethetők, és csatolást létesíthetnek az áramkör elemei között. Ebben a szerkezetben a tiltott sáv jellemzői bármely pontban az elektromos térerősség helyi értékével állíthatók be. Így olyan integrált optikai áramkör készíthető, amelyben az inverz opálkristály rácspontjaihoz egy-egy vezeték kapcsolódik, amely helyi elektromos teret hoz létre, és amellyel az optikai kör tulajdonságai bármikor megváltoztathatók.

Ultravékony zoom-lencse. Kanadai kutatók nemrég a papírnál ötször vékonyabb lencsét fejlesztettek ki, amely mozgó, mechanikai alkatrészek nélkül, elektromos feszültséggel zoomolható. A lencse úgy készül, hogy kis mennyiségű fényérzékeny anyagot adalékolnak a folyadékkristályhoz. Az anyag stabil polimer hálót képez, amikor lézerténnyel megvilágítják. A háló sűrűsége a besugárzó fény intenzitásától függ, és emiatt a lencse a pókhálóhoz hasonlítható: a közepén sűrűbb, mint a szélein. Amikor a lencsére gyenge elektromos teret kapcsolunk, a folyadékkristály a film közepén másként rendeződik, mint a szélein, ezért lencse alakját és optikai tulajdonságait veszi fel. A lencse görbülete (fókuszpontja) változtatható az elektromos feszültség nagyságával és frekvenciájával. Így például a feszültség 1,5 voltól 4,5 voltra növelésével a fókusz távolság 1,6 méterről 8 méterre nő néhány milliszekundum alatt. A kifejlesztett lencse fókusz távolsága 80 cm-től a végtelenig változtatható. Legígéretesebb alkalmazása a kamerákkal ellátott mobiltelefon: ez a lencse sokkal jobb minőségű lehet a jelenleg használt digitális zoom-lencséknél, amelyek csak kinagyítják a kép egy részét, így a kép minősége esetenként kiábrándító.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönettel tartoznak Vajda Anikónak a hátsó borító látható folyadékkristály-fázisokról készített felvételeiért.

Kutatásainkat az OTKA gyakorlatilag alapításától kezdve folyamatosan támogatta (T-14957, F-22771, T-20905, T-30401, T-31808, T-32667 – csak az utóbbi évtized pályázatait említve) és jelenleg is támogatja a K-61075 sz. pályázat keretében.

IRODALOM

- [1] Bata L., *Folyadékkristályok. Új anyagok a tudományos kutatás és gyakorlati felhasználás számára.* Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Lyotropic_liquid_crystal
- [4] Éber N., *Fizikai Szemle* **56**, 123 (2006).
- [5] Buka Á., Tóth-Katona T., Börzsönyi T., Tóth P., *Fizikai Szemle* **46**, 376 (1996).
- [6] <http://www.nol.hu/lap/mozaik/lap-20090115-20090115-46>
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_light-emitting_diode
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic_crystal

SIKLÓSY ZOLTÁN

A cseppkövek: a múltbéli klímakutatás eszközei

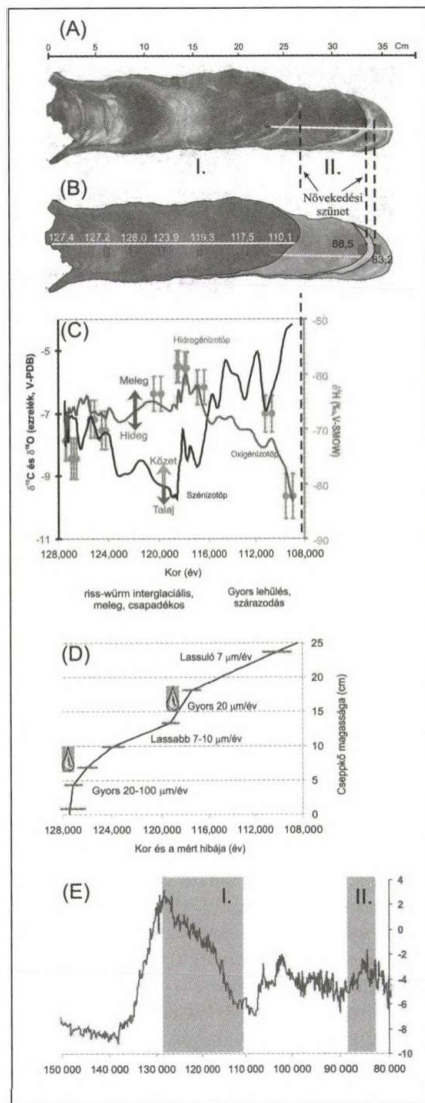
Budapest dombvidékes részein járva többségünknek nem jut eszébe, hogy milyen értékek rejtőznek a mélyben. A föld ismerői azonban tudják, hogy barlangok tucatjai bújnak meg fővárosunk alatt, és szárai hazánk egyéb mészkőhegységeiben. Még kevesebben gondolnak arra, hogy a barlangok legszebb képződményeit, a cseppköveket vizsgálva értékes információkat kapunk a múltbéli klímaváltozások megismeréséhez.

A klímaváltozás és ennek következményeként jelentkező szélsőséges időjárási események környezetvédelmi, gazdasági kárai és humán problémái előtérbe állították a múltbéli folyamatok pontosabb megismerésének szükségességét. A klímaváltozás globális vonatkozásaival már az ENSZ Biztonsági Tanácsa, az IPCC jelentései és az Európai Unió is kiemelten foglalkozott. A klímaváltozások a múltban éhínségekhez, háborúkhoz és népességszökkenéshez vezettek, manapság pedig a benépesült Földön mindezek gyors társadalmi változásokat indíthatnak el. Emiatt egyre nyilvánvalóbb, hogy a múlt jobb ismerete információt nyújt a jövőbeni változások megértéséhez. Ez az igény vezetett a kontinentális területek nagy részén megtalálható klímarekordok kutatásához, amelyek sorában kiemelkedő helyet kapnak a barlangok jeles képződményei, a cseppkövek.

A barlangok a földkéreg csak egy szűk zónájában találhatók meg, de „kutatásuk” már évezredekkel ezelőtt megkezdődött, ahogy azt például a legkorábbi barlangi ősemlékek és festmények jelzik (pl. a 38 000 éves festmények a malajziai Niah-barlangban, a 30–32 000 éves alkotások a francia Chauvet-barlangban és az Altamira-barlang Spanyolországban, 14–18 000 éves képekkel). A barlangi környezet sokféle élőlény számára nyújtott menedéket, ahogy azt a barlangi üledékekben talált bőséges csontleletek is tanúsítják, vagy éppen óvóhelyet a háborús időszakokban az oda menekülőeknek.

A Föld mélyében húzódó sötét, rejtélyes üregek a költőket is megihlették. A megrendült, kétségbeesett és magányos ember a természet megnyugtató menedékét, oltalmazó nyugalalmát látja és látatja Csonkai „A tihanyi echóhoz” írt versében.

A költőt nem véletlenül ihlették meg a barlangok, mások mellett (Petőfi, Kossuth) maga is meglátogatta az aggteleki Baradla-barlangot néhány évvel korábban. Kirándulását anyjához írt levelében érdeklődést kelthető és szemléletesen „publikálta”: „Elindultunk tehát az első ágán és találtunk cseppgökökre s az azokból épült különbözőféle oszlopokra, kősziklákra, omladékokra. A cseppgökök abból áll, hogy a barlang boltozatjáról szüntelen csepeg a legtisztább, leg-hűvösebb víz, mely, mielőtt akár emberre, akár mire cseppen, azonnal kővé válik és így formálódik lassanként a legszebb figurák, melyekből a képzelődés sok dolgot formál magának... Találtunk a barlang fenekén sok ezer ember- és baromcsontokat, melyek a háborús időkbe



2. ábra.

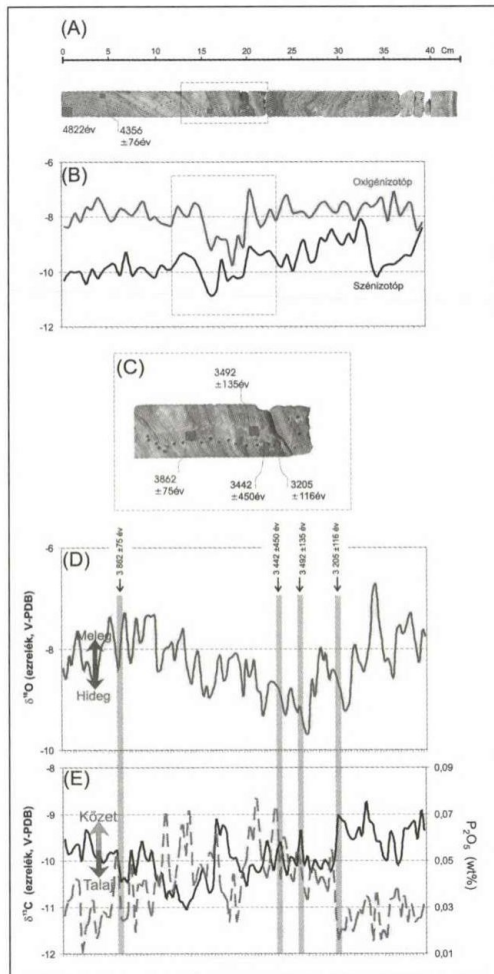
gok és képződményei, azok formagazdagsága és szépsége ismert, de a geológus számára a keletkezés mikéntje még érdekesebb.

AZ MTA Geokémiai Kutatóintézet Geokémia és Paleoklíma Kutatócsoportján belül e sorok szerzője a magyarországi barlangok képződményeit vizsgálja, azokon geokémiai méréseket végez, hogy a múltbéli klíma („paleoklíma”) és környezetváltozásokat nyomon kövesse.

Geokémiai háttér

A cseppkövek vizsgálata nemzetközi szinten az elmúlt néhány évben, évtizedben került a múltbéli klíma- és környezetváltozásokkal foglalkozó kutatók látókörébe. A paleoklimatológiai alkalmazások alapját a vizsgálatok zömét jelentő stabilizotóp-geokémiai alapok bemutatásával szükséges kezdeni.

Izotópoknak nevezzük azokat a kémiai elemeket, amelyek atommagjai azonos számú protonból, de eltérő számú neutronból épülnek fel. Ebből következik, hogy egy adott elem izotópjai ugyanazon helyet foglalják el a periódusos rendszerben, ugyanakkor a tömegszámuk eltérő. Egy elem izotópjainak kémiai tulajdonságai gyakorlatilag azonosak, radioaktív tulajdonságai viszont roppant különbözőek



1. ábra.

odafutott és rejtett szerencsétleneknek csónaikai...”

A régészeti emlékeken túl a barlangok és képződményei, azok formagazdagsága és szépsége ismert, de a geológus számára a keletkezés mikéntje még érdekesebb.

AZ MTA Geokémiai Kutatóintézet Geokémia és Paleoklíma Kutatócsoportján belül e sorok szerzője a magyarországi barlangok képződményeit vizsgálja, azokon geokémiai méréseket végez, hogy a múltbéli klíma („paleoklíma”) és környezetváltozásokat nyomon kövesse.

AZ MTA Geokémiai Kutatóintézet Geokémia és Paleoklíma Kutatócsoportján belül e sorok szerzője a magyarországi barlangok képződményeit vizsgálja, azokon geokémiai méréseket végez, hogy a múltbéli klíma („paleoklíma”) és környezetváltozásokat nyomon kövesse.

Geokémiai háttér

A cseppkövek vizsgálata nemzetközi szinten az elmúlt néhány évben, évtizedben került a múltbéli klíma- és környezetváltozásokkal foglalkozó kutatók látókörébe. A paleoklimatológiai alkalmazások alapját a vizsgálatok zömét jelentő stabilizotóp-geokémiai alapok bemutatásával szükséges kezdeni.

Izotópoknak nevezzük azokat a kémiai elemeket, amelyek atommagjai azonos számú protonból, de eltérő számú neutronból épülnek fel. Ebből következik, hogy egy adott elem izotópjai ugyanazon helyet foglalják el a periódusos rendszerben, ugyanakkor a tömegszámuk eltérő. Egy elem izotópjainak kémiai tulajdonságai gyakorlatilag azonosak, radioaktív tulajdonságai viszont roppant különbözőek

lehetnek. Azokat, amelyeknél nem figyeltek meg radioaktív bomlást (mint például a kormeghatározásra is alkalmas ^{14}C esetén), *stabilis izotópoknak* nevezik. A cseppkövek és egyéb karbonátok vizsgálatánál e stabilis izotópokkal, azok arányaival foglalkozom. A stabilizotóp-geokémia leginkább öt elem, a hidrogén, szén, nitrogén, oxigén és kén stabilis izotópjainak természetbeni eloszlásával és annak törvényszerűségeivel foglalkozik. A paleoklimatológia a fenti öt elem közül is leginkább a hidrogén, a szén és az oxigén, pontosabban a $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, és $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ izotópok arányait vizsgálja. Az izotóparányok meghatározása ezen elemek H_2 , ill. CO_2 gázaiban történik, izotóparánymérő tömegspektrométer segítségével. A vizsgálat során az adott elemek ionjait azok tömegkülönbsége alapján elektromágnes térben szétválasztjuk, majd detektáljuk.

Cseppkövek esetén a pomintákat a felfelvágott és polírozott felszínről, a növekedési irány mentén felvett szelvény mentén fogorvosi fúróval nyerjük a kívánt felbontástól függően laborunkban akár 0,4 mm-es felbontással. A karbonátport savban oldjuk, és az így képződött szén-dioxid oxigén- és szénizotóp-értékét meghatározzuk. A mérések eredményét a nemzetközi etalonhoz viszonyítva ezrelékben a szokásos „ δ ” jelöléssel („delta”) adjuk meg. Minél több a vizsgált anyagban a nehéz izotóp (pl. a ^{13}C és ^{18}O), a δ

érték annál pozitívabb értéket mutat, míg a könnyű izotópban történő dúsulás egyre negatívabb értékeket eredményez.

Mivel a cseppkövek vizsgálatánál leginkább a barlangba szivárgó vízzel és a belőle kiváló karbonáttal, pontosabban kalcittal foglalkozom, a bennük előforduló közös elem az oxigén, így adódik, hogy a cseppkövek *oxigénizotóp-értékét befolyásoló tényezők* részletesebb bemutatásával folytassam az ismertetést.

Az oxigén nehezebb (18-as tömegszámú), ill. könnyebb (16-os tömegszámú) izotópjai más és más arányokban fordulnak elő a karbonátokban, illetve a barlangba becspepő vizekben is. Ezek egymás között történő megoszlása ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ aránya) erősen hőmérsékletfüggő, amint azt Harold Urey 1948-as, paleohőmérséklet-számításokat tartalmazó cikkében bemutatta. Eredményei szerint az állandó oxigénizotóp-összetételű vízből képződő karbonátok (mért) izotóppozíciójának ismeretében a képződés hőmérséklete számítható, azaz két ismert paraméter segítségével a harmadik meghatározható.

Tekintsük át, mi befolyásolja a csapadékvizek stabilizotópos összetételét. A jégsapkák kialakulásának és olvadásának következtében a tengervíz nehéz oxigénizotóp- (^{18}O) tartalma is változik, ami tükröződik a kontinentális területeken hullott csapadéokban is, mivel a felhőket alkotó pára fő forrása az óceánokban keresendő. A szárazföldre hulló csapadék (hidrogén- és oxigénizotóp-összetétele függ a tengertől való távolságtól, a tengerszint feletti magasságtól és a hőmérséklettől, így az aktuális klímaviszonyoktól. A csapadékok oxigén- (^{18}O) és hidrogénizotópos (δD) összetételei között összefüggés van, illetve ezek, és a hőmérséklet között pozitív korreláció van.

Míg egy-egy régió esetén a tengertől való távolság, a ten-

gerszint feletti magasság (geológiai értelemben rövid idő alatt) jelentősen nem változik, addig a klimatikus viszonyokban jelentős változékonyság áll(hat) fenn. A földtörténet során az éghajlat mindig változott. A klímaváltozásokat kiválóan mutatják az antarktiszi jégretek, a több kilométer mély *jégfúrások izotópadatai*. Időben tehát, a klímának megfelelően, az adott területen változik a csapadék összetétele. Ennek a hatásnak tulajdonítható az a megfigyelés, hogy a Kárpát-medence területén a jégkorszak során hullott csapadék ^{18}O és ^{16}O izotóparánya különbözik a modern csapadékvizétől: előbbi $\delta^{18}\text{O}$ értéke -11‰ és -13‰ körül van, utóbbi oxigénizotóp-értéke jóval kevésbé negatív: -8‰ és $-9,5\text{‰}$ tartományba esik, amint azt a felszín alatti, idős beszivárgású vizek (pl. ásványvizek vagy hévizek) stabilizotóp-geokémiai vizsgálata megmutatta. A beszivárgó csapadékvízből képződő kőzetek (barlangi cseppkövek) ezt az izotóppösszetételt tükrözik, így az ilyen képződmények vizsgálatával – a növekedési irány mentén – a múltbeli klímáról kaphatunk információt. A kicsapódó karbonát oxigénizotóp-értékének vizsgálata tehát az oldott karbonátot hordozó víz eredetéről, összetételéről és a képződési hőmérsékletről nyújt információt.

Mivel a karbonátból képződött szén-dioxid $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^{13}\text{C}$ értéke együtt határozható meg a tömegspektrometriás mérés segítségével, ráterek a cseppkövek szénizotóp-értékét befolyásoló tényezők ismeretetésére. A cseppkövek *szénizotóp-értékét* a légköri CO_2 , a talajtakaróban előforduló élő szervezetek által kibocsátott CO_2 és a környező (karsztos) kőzetretek összetétele, ill. beoldódása befolyásolja. A beszivárgó víz oldott széntartalmának esetleges változékonysága a kicsapódó karbonát $\delta^{13}\text{C}$ értékében jelentős változás okoz, mivel az oldott, széntartalmú fázis az egyetlen forrása a cseppkő karbonátjában (CaCO_3) lévő szénnek.

E három paraméter közül a *talajtakaróból* származó CO_2 szerepe a legjelentősebb. Az élő szervezetek szeretnek minél kisebb energiabefektetéssel tápanyaghoz jutni, ezért a környezetükből a kisebb kémiai kötésenergiájú könnyű izotópot, a ^{12}C -t választják. Azaz a növekvő biogén hatás negatív irányba tolja a cseppkő karbonátjából mért $\delta^{13}\text{C}$ értéket. Ezt a hatást erősíti, erősítheti a csapadékmennyiség változása is, mivel a nedvesebb talajtakaróban megnő a biogén szervezetek tevékenysége is.

A felszínre hulló csapadék a beszivárgási útvonal (talajtakaró, kőzetretek, barlang) során elzáródik a talajtakarótól, azaz a további CO_2 -beoldódástól, így a karbonátos kőzetek oldódni kezdenek, a CO_2 pedig eközben felemészti. Ez a folyamat a barlangképződés alapja. Azaz legyen karsztosodni, oldódni képes kőzet (általában mészkő), és legyen beszivárgó, szénsavtartalmú víz, amely oldani képes. Az oldott szénsav forrása tehát alapvetően a talajtakaróban élő szervezeteknek köszönhető, amelyek által kibocsátott CO_2 szénizotóp értéke erőteljesen negatív. A beszivárgás során a karsztos kőzet módosítja a talajra jellemző $\delta^{13}\text{C}$ értéket, mivel a barlangokat befogadó kőzetek általában tengeri eredetű mészkövek, azok $\delta^{13}\text{C}$ értéke pedig 0‰ körül szór. Akárcsak az oxigénizotóp-értékek esetén, jellemzően nem a karbonáton egy-egy pontban mért $\delta^{13}\text{C}$ értéke alkalmas paleoklimatológiai-paleoökológiai következtetésekre, hanem a változások nyomon követése, az értékek időbeni változása az informatív.

A cseppkövek növekedésük közben parányi (mikrométeres) *zárványokat* zárnak magukba. Laborunkban egy újonnan kidolgozott módszer lehetővé tette, hogy a korábbiaknál egy nagyságrenddel kisebb anyagmennyiségből (kb. $0,1\text{ g}$ cseppkőből) feltárható zárványok víztartalma is elemezhető legyen, amelyet így sikerrel alkalmaztunk a cseppkövek szerkezetébe zárodott egykori beszivárgó vizek vizsgálatára. Ehhez a cseppkő szerkezetébe zárodott víz töréses vagy melegítéses feltárása szükséges, amelyből a cseppkő képződésekkor a területen hullott, illetve barlangba szivárgó múltbeli víz eredeti összetétele határozható meg, pontosabban a hidrogénizotóparánya mérhető.

Cseppkövek, mint a múltbeli klímaváltozások hordozói

A barlangi védett légtérben kiváló cseppkövek a képződés körülményeit megőrizhetik szerkezetükben. De hogyan képződnek e különleges formák? A lehulló csapadék átszivárog a talajtakaró zónáján, majd a karsztos kőzeten is. Két alapvető folyamat játszódik le a mélyben. A karsztos kőzet oldódik, pusztul, benne üregek, járatok jönnek létre, másrészt az így kialakult üregekbe egyenletesen csepegő, sok oldott karbonátot tartalmazó vízből különböző ásványkiválások jönnek létre. Ezek közül talán a leggyakoribb az ásványtanilag kalcitként meghatározható cseppkő (CaCO_3).

A kiválás üteme azonban nem egyenletes; ezt, és az esetleges növekedési szüneteknek a létét a növekedési szakaszok mentén tapasztalható leállási felületek (hiátusok), ill. az eltérő közettani tulajdonságokkal rendelkező cseppkőszakaszok pontos kora mutatja meg.

Nézzük meg, hogyan képesek a klimatikus változásokat rögzíteni a cseppkövek. A mélyben levő nagyobb üregekben a hőmérséklet ingadozása jóval kisebb, mint a felszínen. A barlangok légkörhőmérséklete évszakonként csak minimálisan változik, ill. az adott terület évi középhőmérsékletével megegyező értéket mutat. Magyarországon ez ma $5\text{--}13\text{ °C}$, attól függően, hogy a Bükk-fennsík, vagy Dél-Magyarországon járunk, de a pleisztocén időszak leghidegebb periódusaiban ez akár $5\text{--}9$ fokkal is alacsonyabb lehetett. Ebben a hirtelen változásoktól védett barlangi környezetben válik ki a felszín felől beszivárgó túltelített oldatból a cseppköveket alkotó kalcit. Bizonyos időszakokban tehát a jégkorszaki csapadék összetételét tükrözve, majd azt követően a melegebb korokra utalva. A kormeghatározásoknak köszönhetően ma már évszázadekig visszamenően meg tudjuk határozni a visszatérő jégkorszakok időbeni határait, vagy akár ki tudjuk jelölni a rövidebb klímamutatók bekövetkeztét.

A cseppkövek a következő paraméterek miatt kerültek „előnybe” sok más képződménnyel szemben (pl. jégmag-fúrások, faévgyűrűk, tavi üledékek, tőzeglápok):

- a cseppkövek a Földön sokfelé megtalálhatóak;
- a felszínen érvényesülő gyors változásoktól mentes védett környezetben megőrződnek, ill. a kivált rétegek nem keverednek;
- állandó környezeti feltételek mellett időben megközelítően folyamatos szelvényt eredményeznek (tíz-százézer éven át);
- abszolút koruk „könnyen” meghatározható (úránorsorozatos kormeghatározás, ^{14}C -módszer), kb. $600\,000$ évig.
- a fejlett technikai eszközökkel egy adott mintából számos geokémiai paraméter meghatározható (stabilizotópok, nyomelemek, laminevasztagság, szervesanyag-tartalom), amelyek információk nyújtanak pl. a barlang (ezáltal a régió) hőmérséklet-, csapadék-, növényzet- és talajtakaró-változásaira.

A hazai cseppköveken elvégzett nagyszámú (>160) úránorsorozatos kormeghatározás révén megállapítható, hogy az elmúlt évszázadek során nem egyenletesen, ill. nem a fiatalodással, azaz a nagyobb esélyű megőrződéssel arányosan kapunk koradatokat, hanem azok a földtörténeti múlt jellegzetes, meleg időszakaival fednek át. Így a cseppkövek geokémiai vizsgálatával a hazai klímamutatók kialakulása, pontos kora és a környezeti viszonyok nyomon követése válik lehetségessé.

Az eddigi kutatások során vizsgált legrégibb cseppkövünk több százézer éves, de a jelen tanulmányban az Aggtelek-jósvafői Baradla-barlangból származó, az említett kornál fiatalabb mintával (BAR II.), illetve a mecseki Trió-barlangban megfűrt cseppkövel foglalkozunk.

Esettanulmányok

Az eemi klímamutató és az átmenet a legutolsó jégkorszakba

A hazai cseppkövek geokémiai vizsgálatainak sorában kiemelt szerepet kapott a Baradla-barlangból származó (BAR II., **1.a ábra**) minta, mivel megállapítható, hogy a képződési idő a földtörténet legutóbbi melegebb időszakára esett. Ezáltal lehetőség nyílt az adott időszakra jellemző, globálisan kimutatott klímaváltozás bizonyítékainak keresésére az adott

mintában, másrészt a pontos kormeghatározásokkal és a geokémiai vizsgálatokkal elsőként áll módomban adatokat szolgáltatni az adott időszak regionális klíma- és környezetváltozás vizsgálatához.

A cseppkövekre olykor jellemző leállási felületek jelen cseppkőmintában is kimutathatóak (**1.b. ábra**), így e munkában a 0-27 cm közötti szakasszal foglalkozom. A cseppkő növekedése az uránsorozatos kormeghatározások alapján 127 400 éve indult és 110 100 éve állt le. A mért korok jellemző hibája ± 700 és ± 1300 év között van, így kisebb, mint relatív 1%, amelyet a legmodernebb technika alkalmazásával sikerült elérni. Az említett időszakban képződött cseppkőszakaszt a növekedési irány mentén mikrofúróval mintáztam, az izotóptértek meghatározása érdekében, amelyből szerkesztett görbét a **1.c. ábra** mutatja.

A pontos és nagy számú kormeghatározások lehetővé tették az időszakon belüli növekedési ütemek meghatározását is, amelyek alapján kijelölhető két, gyorsabb képződéssel jellemezhető időszak a klímáoptimumon belül (127-126, és 119-117 ezer évvel ezelőtt; **1.d. ábra**). A legmelegebb időszakot a maximális hidrogén- és oxigénizotóp értékek mutatják, amelyek, mutatva a beszivárgó víz és a területre hulló csapadékvíz összetételének klímfüggését, egybeesnek, 118 ezer évnél. Ezt követően jelentős, negatív irányú eltolódás mutatható ki mind az O-, mind a H-izotópok esetében. A szénizotóp-értékek a növekedés megindulását követően negatív irányú eltolódást szenvednek (1.c. ábra), ami fokozódó talajaktivitást jelöl (meleg és csapadékos klíma). Ennek maximuma 119 ezer évnél van, ami felhívja a figyelmünket az eltérő időzítésű hőmérséklet- és (feltételezhetően) csapadékváltozásra. Ezt követően a cseppkő növekedésében bekövetkezett leállási felületig (110 000 év) jelentős pozitív irányú eltolódás figyelhető meg a szénizotóp-értékekben, csökkenő talajaktivitást jelezve. Ennek alapján egy lehűlő és szárazabbá váló klíma rekonstruálható, amit megerősít a bekövetkező növekedési ütem csökkenése, majd a képződési szünet is (1.d. ábra).

A BAR. II-as cseppkőminták képe (A), a megfigyelhető növekedési szakaszok (I.-II.) a korokkal, és a leállási felületekkel (B), a stabilizotóp-értékek a cseppkő növekedési szakaszai mentén felvett szelvény vonalában (C), A kormeghatározások alapján számított növekedési ráta változása a cseppkő növekedési irányában (D) a Voszok jégmagfúrás izotópadatai alapján rekonstruált paleohőmérséklet-adatok illetve a BAR VIII.-as cseppkő növekedési periódusai (I.-II.) az elvégzett kormeghatározások alapján a kor függvényében (E).

A földtörténeti szempontból rövidebb időszakokban bekövetkezett változások fontos társadalmi hatásúak. A késő-holocén utolsó kb. 4800 évben képződött mecseki, Trió-barlangból származó megfűrt cseppkőminták (**2.a. ábra**) példáján a középső bronzkor klimatikus változásait mutatom be. A középső bronzkor társadalmi szempontból békés korszak volt, így a Kárpát-medencében élő népek hosszabb, egy helyben lakásra tudtak berendezkedni, ugyanakkor tudjuk, hogy a korszak az élelő telepek a dombtetőkre koncentráálódtak. Megváltozott az állattenyésztési struktúra is, feltehetően a csapadékosabb éghajlat miatt, mocsarassá váltak jelentős területek. 300 év múlva ismét szétszóródtak a telepek, az éghajlat szárazabbá válásával.

A Trió-barlangból származó cseppkő fűrómag képe, és a részletes vizsgálatokra kijelölt cseppkőszakasz (A), a szén és oxigénizotóp értékek a cseppkő növekedési irány mentén felvett szelvényen, a jelentős változásokat tükröző szakasz bekeretezve (B) a részletesebben vizsgált középső bronzkor idején képződött cseppkőszakasz (C), a legjelentősebb változásokat mutató szakasz részletesebb, nagy felbontású oxigénizotóp geokémiai vizsgálata, a mért korokkal (függőleges sávok –D) a cseppkőszakasz szénizotóp értékének és a foszfor koncentrációjának változása a felvett szelvény mentén, a mért korokkal (függőleges sávok –E).

De hogyan tükrözik a régészek által tapasztalt változásokat a cseppkövek? Először durva felbontással (centiméterenként) mintáztam a Trió-barlang cseppkövének fűrómagját a növekedési irány mentén (**2.b. ábra**), majd a legnagyobb változásokat tükröző szakaszból urán-

sorozatos kormeghatározásokat (**2.c. ábra**), illetve a szakaszból nagy (mm alatti) felbontással további C- és O- izotópos vizsgálatokat végeztem. A cseppkőszakasz növekedése közben bekövetkezett környezeti változások pontosabb nyomon követése érdekében a nyomelem-összetételét és a hidrogénizotóp értékeit is vizsgáltam. A kalcit mért $\delta^{18}\text{O}$ értéke jelentős negatív irányú eltolódást mutat kb. 3800-3400 év között (**2.d. ábra**), majd néhány évtizedes ciklicitással visszatér a kiindulási érték közelébe. A $\delta^{13}\text{C}$ értékeit összevetve a nyomelem-geokémiai vizsgálatok során mért foszfor (P) értékeivel az időszak csapadék és talajaktivitás változásainak még pontosabb vizsgálata válik lehetségessé (**2.e. ábra**), mivel a foszfor gyakorlatilag egyetlen forrása az elkorhadó növényzet karsztrendszerbe bemosódó szerves eredetű molekulái. A $\delta^{13}\text{C}$ és P között fennálló fordított arányosság (2.e. ábra) a vizsgált időszakban növekvő biogén aktivitást jelez a negatív irányú $\delta^{18}\text{O}$ érték eltolódásával. A lehűlés, amit az oxigénizotóp-értékének eltolódása mutat, alapvetően korlátozva a talajzónában lévő szervezetek aktivitását, ha egyidejűleg szárazabb klíma köszöntene be, de jelen esetben ennek az ellenkezője, azaz a csapadékosabb klíma magyarázza az észlelt változásokat. Ezt követően melegebb, és egyúttal szárazabb klíma köszöntött be, amelyet jól tükröz a P mennyiségének csökkenése a $\delta^{18}\text{O}$ értékének növekedésével (kb. 3200 évtől).

*

A kiválasztott hazai cseppkövek geokémiai vizsgálata alapján megállapítható, hogy sikerült a hazai paleoklimatológiai témájú kutatások körébe bevonni egy új, korábban ilyen szempontból nem vizsgált forrást. A cseppkövekből származó szén- és oxigénizotóp-összetételek információt nyújtanak az utolsó interglaciális-glaciális átmenete idején bekövetkezett hőmérséklet és csapadékmennyiség változások pontos időzítéséhez, a felmelegedési időszakok pontosabb ismeretéhez, számszerűsítéséhez. A középső bronzkori klimatikus változások a társadalmakat is érintő, gyors lefolyású környezeti változásokra, illetve a változások éves-évtizedes felbontásával annak mértékére, extremitására nyújtanak információt. A cseppkövek nagy felbontású komplex geokémiai vizsgálata egyedülálló forrást nyújtja a hazai paleoklimatológiai kutatásoknak. Az eddigi eredmények megmutatták, hogy a földtörténeti múlt jelentős változásait tükrözik a cseppkövek, de ezen felül a rövidebb ciklusidejű klíma és környezetváltozások is kimutathatóak. A Kárpát-medence, ill. szűkebb régiók viselkedése és válaszreakciója ezáltal pontosabban megadható. A nyugat-európai klímarekordok arra utalnak, hogy egy erőteljes felmelegedési szakaszban extrém időjárási körülmények uralkodnak, de a Kárpát-medence viselkedését nem ismerjük. Az évezredekre visszanyúló, Magyarország területét akár évtizedes felbontású adatsorokkal az adott régió nagy felbontású klíma és környezeti rekonstrukciója válik lehetővé.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást támogatta az OKTA T 049713 pályázata, és az MTA kétoldalú együttműködése Tajvannal. Köszönet továbbá a Magyar Meteorológiai Társaság pályázata által nyújtott támogatásért.

IRODALOM:

- Craig, H. 1961: Isotopic variation in meteoric waters. *Science* 133: 1702-1703.
 Deák, J. (1995): A felszín alatti vizek utánpótlódásának meghatározása izotópos módszerekkel az Alföldön. VITUKI Zárójelentés, Budapest.
 Demény, A. (2004): Stabilizotóp-geokémia. *Magyar Kémiai Folyóirat*, 109-110.
 McDermott, F. és E.I.M.F. (2006): Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth Science Reviews* 75: 05-153.
 IPCC Fourth Assessment Report 2007: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>
 Petit, J.R. et al., (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436.
 Siklósy, Z., Demény, A., Vennemann, T.W., Pilet, S., Kramers, J., Leél-Ossy, Sz., Bondár, M., Shen, C.-C. and Hegner, E. 2009: Bronze Age volcanic event recorded in stalagmites by combined isotope and trace element studies. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 23/6: 801-808.
 Urey, H.C., Epstein, S., McKinney, C. és McCrea, J. (1948): Method for measurement of paleotemperatures, *Geological Society Of America Bulletin* 59/12.