

A RADONTRANSPORT DINAMIKÁJÁNAK VIZSGÁLATA A VASS IMRE-BARLANGBAN ÉS A CSERSZEGTOMAJI- KÚTBARLANGBAN VÉGZETT MÉRÉSEK ALAPJÁN

Dr. Haki József

ÖSSZEFOGLALÁS

A radon töredezett porózus közegeken belüli transzportját leíró hagyományos egyenletekben a diffúzió és a nyomáskülönbség által hajtott makroszkopikus áramlás felelős a radon mozgásáért. A porózus közegeken belüli repedések rendkívül alkalmasak az áramlás kialakulására, de a makroszkopikus áramlás irányára merőleges oldalirányú radondiffúzió módosító hatása is jelentős lehet. A szerző ezen két fizikai folyamatot vizsgálja a Vass Imre-barlang és a Cserszegtomaji-kútbarlang példáján. Az itt tapasztalt jelenségek az említett radontranszport folyamatok két szélső, különleges esetét képviselik.

Ez a cikk azzal a céllal íródott, hogy közreadjunk valamit azokból a tapasztalatokból, amelyeket évek hosszú során számos barlangkutató áldozatkész segítségével gyűjtöttünk össze a magyarországi karsztbarlangokban folytatott radonmérések eredményeként. Munkájukért ezúton is köszönet. A cikk nagyrészt a Vass Imre-barlangban folytatott legújabb mérésekre támaszkodik, de merít a Cserszegtomaji-kútbarlangban mért adatokból is, a hangsúlyt a radontranszportot vezérlő fizikai folyamatok megvilágítására helyezve. Reményeink és terveink szerint a Magyarországon folytatott barlangi radonmérések eredményeiről a jövőben egy átfogóbb és részletesebb áttekintést is adunk, a barlangkutatókra vonatkozó sugárterhelési adatok vizsgálatával együtt.

A radon tulajdonságai, transzportjának általános leírása

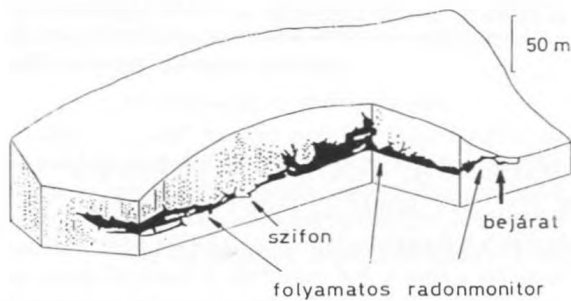
A földkéreg kisebb-nagyobb mértékben tartalmaz valamennyit a természetben előforduló radioaktív ^{238}U , ^{232}Th és ^{235}U családok tagjaiból. Ezen családok tagjai a ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (toron) és ^{219}Rn (aktinon) radonizotópok is, melyek közül vizsgálatunk tárgyát a ^{222}Rn (továbbiakban radon) transzportja képezi. A radon legfontosabb fizikai tulajdonsága, hogy radioaktív: alfa-rész kibocsátása útján bomlik. Emiatt jól detektálható, hiszen az alfa részek megfelelő érzékelők segítségével akár egyenként megszámlálhatók. Az anyaelemekről a

rádióaktív bomlástermékek a kőzetekben ill. a talajban maradnak, amelyen belül azonban geológiai időtartamokkal mérve vándorolhatnak. Mozgékonyosság szempontjából minőségi különbséget jelentenek a többi bomlástermékhez képest a bomlási sorok nemesgáz tagjai, amelyek (nemesgázok lévén) kémiaiilag semlegesek. Nagyobb mozgékonyosságuk révén rövidebb idő alatt kijuthatnak és elvándorolhatnak keletkezési helyükről, vándorlásuk során nyomjelezve a szállító közegeket. E folyamatban a három radonizotóp közül a radon szerepe a legjelentősebb a többiekénél lényegesen nagyobb felezési ideje miatt (a felezési idők a radon, toron és aktinon izotópokra rendre 3.8 nap, 55.6 sec, 3.9 sec).

A kőzetek pórussterébe kijutott radon mozgását a továbbiakban a diffúzió ill. a pórusokat és repedéseket kitöltő közeg – folyadék vagy gáz – áramlása határozza meg. A radon mozgása a következő egyenlettel írható le:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c - \frac{1}{\varepsilon} \nabla(v\varepsilon) - \lambda c + \phi \quad (1)$$

ahol c a radon pórustérfogati koncentrációja, D a radon effektív diffúziós együtthatója, ε a közeg porozitása, v a szállító közeg sebessége, λ a radon bomlási állandója, ϕ a radon keletkezési üteme. A szállító közeg v sebességét a porózus, repedezett közegre vonatkozó gáz vagy folyadék mozgásegyenleteinek megoldása útján kapjuk. A kialakuló folyamatokat a pórusok, repedések és járatok



1. ábra. A Vass Imre-barlang térbeli elhelyezkedése. A folyamatos radonmérőket 10, 300 és 600 m-re helyeztük el a bejáratától.

Fig. 1. Block section of the Vass Imre cave with the locations of the continuous radon monitors. The monitors are placed 10, 300 and 600 m from the entrance.

méretétől és térbeli elhelyezkedésétől függő, a külső meteorológiai paraméterek hatásának eredményeként létrejövő légáramlások határozzák meg. Tekintsük át egyszerű esetekben az utóbbi jelenséget!

A légáramlások és a meteorológiai paraméterek viszonya

Két bejáratral rendelkező barlang esetében ún. kéményhatás elvén működő légáramlások jöhetnek létre, amelyek hajtóereje a külszíni és a barlangi levegő sűrűségkülönbsége. Ez a sűrűségbeli eltérés az általános gázörvényen keresztül visszavezethető a külszíni (T_k) és barlangi (T_b) levegő hőmérsékletében meglévő különbségre. Az így keletkező légáramlás sebessége ATKINSON T.C. et al. (1983) szerint:

$$v^2 \propto \frac{1}{f} \frac{h}{L} \frac{|T_k - T_b|}{T_k} \quad (2)$$

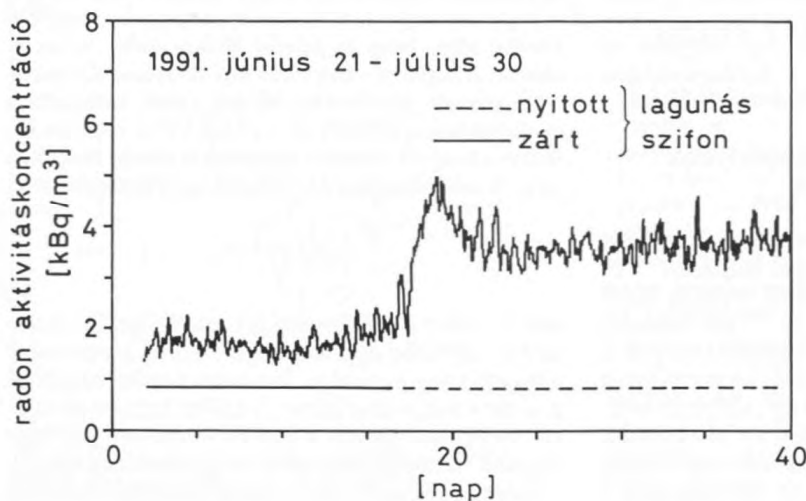
ahol h a két bejárat közötti magasságkülönbség, L a barlang hossza, f a járat formájától, hosszától függő áramlási sűrűlási tényező. Látható, hogy nagyobb hőmérsékletkülönbséghez nagyobb áramlási sebességek tartoznak. Megjegyzem, hogy a fenti két bejárat egyike nem feltétlenül bejárat az ember számára is. Hasonló elven működő légáramlások alakulhatnak ki három- vagy több bejáratú rendszerek esetében.

Egy bejáratú barlangokban, a hőmérsékletkülönbségek által hajtott légmozgásokon túl, az atmoszférikus nyomásváltozások hatása is jelentős. Ilyen jellegű jelentős barlangi légáramlások elsősorban vízzáró rétegekkel fedett, töredezett rendszerek esetén várhatók. Ha az atmoszférikus nyomás (p_a) egy állandó p_0 érték körül p_1 ($p_1 \ll p_0$) amplitúdóval, ω körfrekvenciával szinuszosan ingadozik, azaz $p_a = p_0 + p_1 \sin(\omega t)$, akkor p_1 vízszintes barlangjárát esetében a bejáraton át áramló levegő sebessége WIGLEY T.M.L. (1967) szerint:

$$v \propto p_1 \sqrt{\frac{\omega p_0 k}{\epsilon}} \cos(\omega t - \frac{\pi}{4}) \quad (3)$$

ahol k a befoglaló közeg permeabilitása. Látható, hogy gyorsabb változásokhoz (nagyobb ω) nagyobb sebességek tartoznak. Az összefüggés által jelzett lényeges jelenség az áramlási sebességben meglévő késleltetés a nyomásváltozáshoz képest.

Általános esetben a felszíni nyomás és hőmérsékletváltozások együttes hatására kialakuló áramlások jellege rendkívül összetett, s ennek megfelelően a mért radonkoncentráció változások is a külső meteorológiai paraméterek bonyolult függvényei.



2. ábra. A szifon nyitása után megfigyelt radonkoncentráció változás a Vass Imre-barlangban a bejáratától 300 m-re lévő mérési ponton.

Fig. 2. Transient part of the radon time series observed 300 m from the entrance of the Vass Imre cave after the opening of the syphon.

Mérési technika

Az MTA Atommagkutató Intézete 1978-ban kezdte el a környezeti radonméréseket. Azóta Magyarország számos karsztos területén, mintegy 150 felszín alatti mérési helyen folytak legalább egy év időtartamú mérések. A természetes eredetű radonhoz kötött környezeti alfugázás térbeli és időbeli változásainak méréséhez diffúziós elven működő, integrális, főleg nyomdetektorokkal felszerelt mérőedényeket használtunk (SOMOGYI G. *et al.* 1984). Az utóbbi években a nyomdetektort egy tokozatlan fotodiódával helyettesítve elektronikus mérőműszerek is alkalmazásra kerültek. Az elektronikus módszer segítségével a mérések időfelbontása jelentősen javult, a gyakorlatban egy órás integrálási idő bizonyult kedvezőnek. A megnövelt időfelbontás miatt a lejátszó folyamatok időbeliségét sokkal részletesebben tudjuk követni. Mivel a diffúziós folyamatot jellemző időállandó a radon felezési idejéből következően néhány nap körüli, ez a megnövekedett időfelbontás teszi elvileg lehetővé, hogy különbséget tegyünk az áramlásos és diffúziós folyamatok között.

Kísérleti előzmények

A földalatti radontranszport két komponensű keverék (radon és vivő gáz vagy folyadék) heterogén közegen keresztüli háromdimenziós mozgása, ahol a diffúzió és az áramlás egyaránt jelentős lehet. Ezen folyamatok általános kvantitatív leírása az üregformációk széles skálájának megfelelő ismeretlen és változatos határfeltételek miatt aligha lehetséges. Ez a nyilvánvaló sokféleség

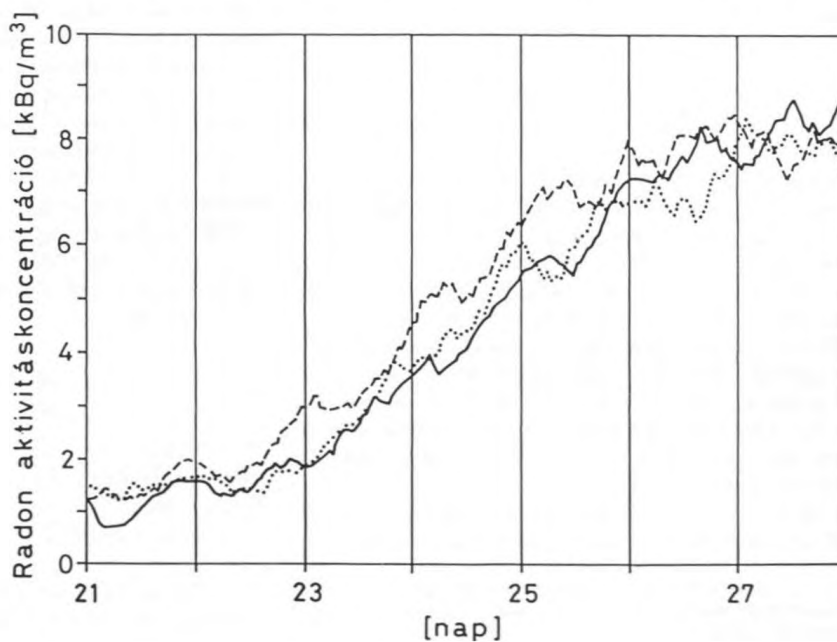
szerencsére nem tükröződik a megfigyelt radon idősorokban (HAKL J. *et al.* 1992). Az idézett közleményben feldolgozott 34 eset mintegy 80%-ában jellegzetes szezonális változást találunk nyári (60%) vagy téli (20%) maximumokkal. A megfigyelt szezonális változások egy részének magyarázatára egy kvalitatív ún. légcirkulációs modell került kidolgozásra (GÉCZY G. *et al.* 1988, CSIGE I. *et al.* 1990). A modell a barlangi levegő radontartalmának változását a felszíni és a felszínalatti levegő hőmérsékletkülönbségeiből adódó sűrűségkülönbséggel hozza kapcsolatba. Ez a sűrűségkülönbség a barlangot fedő karsztos rétegen keresztül légmozgást idéz elő. A modell szerint ez az áramlás, összhangban a (2) összefüggéssel szezonálisan változó irányban mosza ki a levegőt a karsztos területek radonban dús repedéseiből. A Hajnóczy-barlang feletti repedésekben és a barlangban mért radon idősorok ellenütemű változása szolgáltatta a legjobb bizonyítékot erre a modellre (HAKL J. *et al.* 1992). A felszíni hőmérséklet és a Szemlő-hegyi-barlangban mért radonkoncentráció jó korrelációja hasonlóan jó bizonyíték (GÉCZY G. *et al.* 1993).

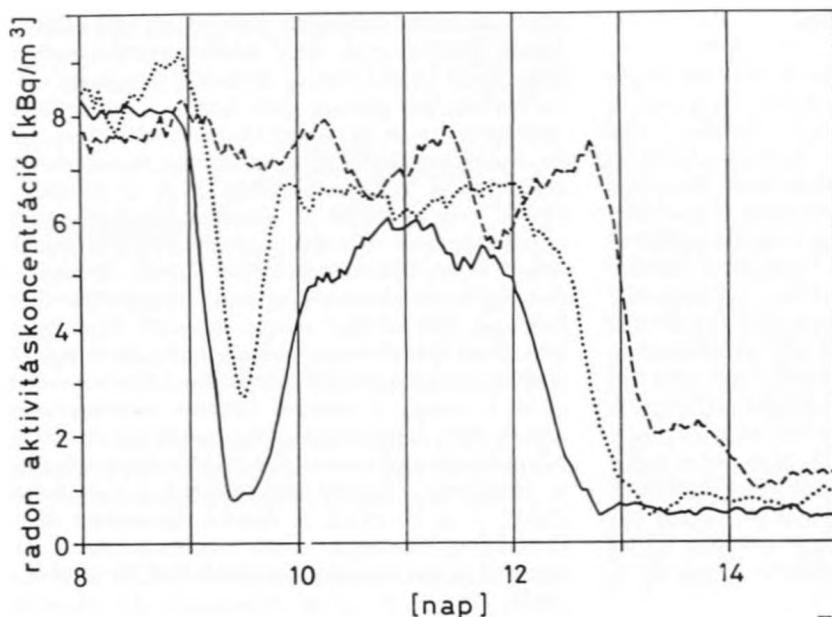
Elméleti megfontolások

A légcirkulációs modell ugyanúgy, mint a (2) és (3) összefüggések a transzportot vezérlő fő fizikai folyamatként az áramlást sugallja. Ez a következtetés egyáltalán nem nyilvánvaló, ugyanis a repedések mérete és sűrűsége jelentős szerepet játszik a bennük kialakuló folyamatok dinamikájában ugyanúgy, mint a kialakuló lehetséges telítési radonkoncentrációkban (HAKL J. 1993). A

3. ábra. Atavaszi radonszintek emelkedése a Vass Imre-barlang bejárattól 10 m-re (folytonos vonal), 300 m-re (pöttyözött vonal) és 600 m-re (szaggatott vonal) lévő mérési pontokon; 1993. április.

Fig. 3. Springtime (April, 1993) rise of radon levels at the monitoring stations of 10 m (solid line), 300 m (dotted line) and 600 m (dashed line) from the entrance of the Vass Imre cave.





4. ábra. A Vass Imre-barlangban mért folyamatos radon idősorok őszi részlete; 1992 október. A görbék jelölése meg egyezik a 3. ábránál használtakal.

Fig. 4. A part of the autumn continuous radon records in the Vass Imre cave (October, 1992). For the notation of curves see figure 3.

különböző paraméterek hatása jól becsülhető a porózus közegbe ágyazott háromdimenziós hengeres üreg modelljén keresztül. A henger méretétől függően azt egyaránt tekinthetjük repedésnek vagy barlangi járatnak. Az üreg hossz tengelye menti radontranszportot jellemző paraméter az ún. relaxációs hossz (z), amely távolság megtétele során az áramló levegő és porózus környezete között meglévő radonkoncentráció különbség $1/e$ -ad részére csökken ($e = 2,7183$). Esetünkben ez analitikusan:

$$z = \frac{v}{\lambda} \frac{1}{2 \frac{z_d}{r} R + 1} \quad (4)$$

ahol z_d a radon effektív diffúziós hossza a kőzetanyagban, r a henger sugara, R pedig a módosított nulladrendű Bessel függvény deriváltjának és magának a függvénynek negatív előjellel vett hányadosa ($R = -K'_0/K_0$) az r/z_d helyen. A (4) összefüggés figyelemreméltó tulajdonsága, hogy a relaxációs hossz egyaránt függ az áramlási sebességtől és a geometriai mérettől. A formulának megfelelően két szélső eset különböztethető meg:

a) abban az esetben ha $z \ll z_d$, a diffúzió dominál és a mozgó közeg radonkoncentrációja az uralkodó oldalirányú transzport miatt nagyon gyorsan alkalmazkodik környezetéhez.

b) ha $z \gg z_d$, akkor az áramlás dominál és a radon a diffúzió sebességénél sokkal gyorsabban mozog.

* Az (1) egyenlet hengerkoordinátákban felírt időfüggetlen alakja ún. Bessel-féle differenciálegyenlethez vezet, melynek a megoldásai az ún. Bessel-féle függvények.

Eredmények

Általánosítva ezeket a következtetéseket valódi barlangrendszerekre, vizsgáljuk meg először a fenti megfontolások érvényességét a Vass Imre-barlangban (1. ábra) mért radon idősorok alapján. E barlangnak közel 600 m hosszú vízszintes járata van, amelyben egy barlangi szifon található. A bejáratú ajtó felett lévő kb. 100 cm^2 -es felületű, a légáramlás sebességének mérésére kialakított nyíláson a levegő nyáron kifelé, télen befelé áramlik. Az áramlás maximális sebessége 2 ms^{-1} , átlagosan $0,1 \text{ ms}^{-1}$ (HOLL B. 1992). Ha a szifon zárva van, mérhető áramlás nem mutatható ki.

A radonkoncentrációt a barlang főjárata mentén több-kevesbé egyenletesen elhelyezkedő 12 ponton 1987 óta nyomdetektorral, valamint 1991–93-ban három folyamatos radonmérővel mértük (1. ábra).

A havonta cserélt nyomdetektorok magas nyári és alacsonyabb téli értékeket mutattak, lassú szinuszszerű időbeli változással. A barlang főjárata mentén az eloszlások egyenletesek voltak. Az egyes szakaszokra és időszakokra jellemző radonértékeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

	szifon előtt		szifon után		éves
	tél	nyár	tél	nyár	átlag
szifon nyitva (légáramlás van)	1,1	8,4	1,1	8,3	4,8
szifon zárva (légáramlás nincs)	2,5	4,0	3,5	3,1	3,3

1. táblázat. A Vass Imre-barlangban mért átlagos radon aktivitáskonzentrációk (kBq/m^3) (1987–93)

Szerencsés lehetőséget kínál a modell paramétereinek becsléséhez a szifon mögötti barlangszakasz időnkénti természetes lezáródása. Az utóbbi években ez egyaránt előfordult a nyári és téli időszakban is. Az 1. táblázatban látható, hogy zárt szifon esetén a téli értékek a szifon előtt mintegy 20%-kal kisebbek, a nyáriak pedig mintegy 20%-kal nagyobbak a szifon mögötti értékekéhez képest. Nyitott szifon esetén a barlangban mind télen, mind nyáron egyenletes radonszintek tapasztalhatók. Ez esetben a szifon előtti „zárt” szintekhez képest a nyári értékek magasabbak, a téliek pedig alacsonyabbak egy további kettes szorzóval. Ha átlagértéknek elfogadjuk a zárt szifon mögötti nyugalmi szintet, akkor nyitott szifon esetén a barlangot fedő rétegen keresztüli le- és feláramlások egy asszimétrikus hatást eredményeznek, mintegy 40%-kal megnövelve a barlangi főjártaiban kialakuló évi átlagos radonkoncentrációt. A jelenség jól értelmezhető a légcirkulációs modellel, amely szerint nyáron a külső levegő a fedő kőzetet átjárva benyomja a radont a főjáratba, télen pedig a bejárat felől érkező levegő hígítja.

A transzportfolyamat finomabb részletei a folyamatos radonmérővel kapott idősorokból következtethetők ki. Az 1991-es nyári szifonnyitás után észlelt átmenet jelzi, hogy a radon nem közvetlenül a repedésrendszerből mosódott ki. A görbe alakja (2. ábra), összevetve azt a porózus közegek radonkibocsájtását vizsgáló numerikus számítások eredményével (JANSSENS A. et al. 1984), hirtelen nyomásesést jelez, aminek hatására azonnali légáramlás alakult ki. Az átmenet a radon bomlási időállandójával jellemezhető, azaz a repedésrendszerből a főjárat felé kiürülő radon transzportját a diffúzió irányítja. A radonkoncentráció regisztrátumokban hiányzanak a napi légáramlás fluktuációknak (HOLL B. 1992) megfelelő erős napi változások, ami szintén a fenti következtetést tá-



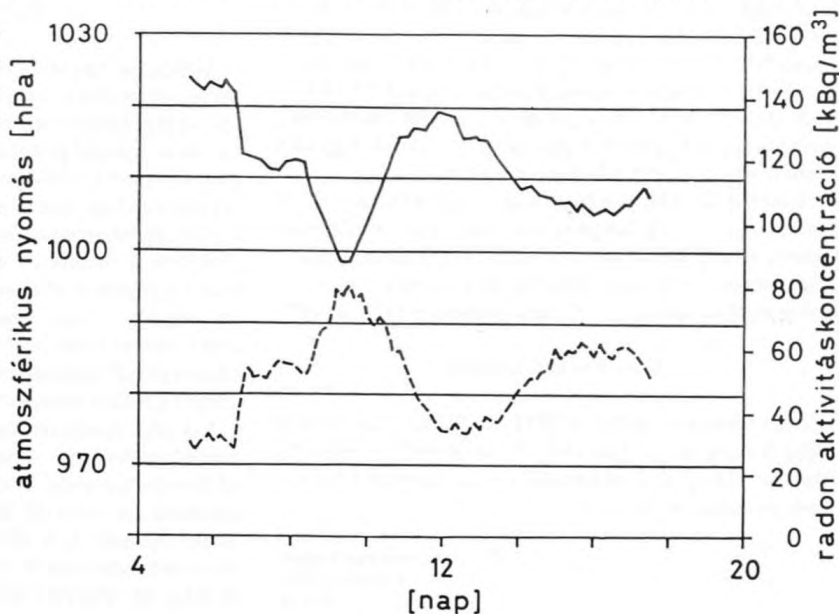
Folyamatos radonmérő

Continuous radon measuring device

masztja alá. Ugyanerre a diffúziós kontrollra egy másik példa a radonszintek tavaszi emelkedése: a barlang csak 4–5 nap után éri el magas radonkoncentráció állapotát (3. ábra). E látszólagos ellentmondások (jön a légáramlás, de nem jön vele a radon) feloldása a transzportfolyamatok háromdimenziós jellegében rejlik. A radonkon-

5. ábra. A Cserszegtomaji-kútbarlangban mért radon aktivitáskoncentráció (szaggatott vonal) és légnyomás (folytonos vonal) időbeni változása; 1993. április.

Fig. 5. Radon activity concentration (dashed line) and atmospheric pressure (solid line) in the Cserszegtomaj well cave; April, 1993.



centráció először ugyanis esetünkben a főjárat falában, annak a repedésekhez közeli részein nő meg. Ezt a folyamatot pedig a diffúzió irányítja és így keletkezik késleltetés a folyamatban.

E jelenségekkel szemben a barlangi légáramlások megfordulását kísérő őszi radonszintek leesése áramlásos folyamatokkal magyarázható. Egy rövid ideig tartó októberi hidegfront hatása jól látható a 4. ábrán. A megfordult légáramlás az első és a második mérési ponton lecsökkentette a radonszintet, de a hatása nem ért el a harmadik pontig (ui. a légáramlás a front elvonulása után újból megfordult). A magas radonszintek a front elvonulása után újból visszaálltak.

Stabilan alacsony radon értékek csak a következő, tartósabb külső lehűlés után álltak be. Az ábráról jól látható, hogy határozott időkülönbség van az egyes görbék leesése között. Figyelembe véve a mérési helyek távolságát, ez mintegy 50 m/h légáramlási sebességnek felel meg a barlang főága mentén.

Második példaként vizsgáljuk meg a Cserszegtomaji-kútbarlangot. A szövevényes alaprajzú barlang horizontális kiterjedésű, járatai a pannon agyag alatt kovás homokkő és földolomít réteghatára mentén alakultak ki. A fedő kis permeabilitású agyagréteg miatt az atmoszférikus légnyomásváltozások által kiváltott légáramlások szerepe felértékelődik, ui. hőmérséklet különbségekhez köthető, kéményhatás elvén működő légáramlások megfelelő körülmények híján nem tudnak létrejönni. A Cserszegtomaji-kútbarlangban megfigyelt radonsorok jól mutatják ezt a hatást (5. ábra). A jelenségben az áramlás hatása a domináns, mint ahogy azt a légnyomásváltozást kísérő, gyakorlatilag azonnali radonváltozások mutatják. Csökkenő légnyomás hatására nő a radonszint és fordítva.

A Vass Imre-barlangban tapasztaltakkal szemben itt az áramló levegő gyorsan ki tudja sodorni a radont a repedésekből még mielőtt az oldalirányba el tudna diffundálni. A radonkoncentráció és a légnyomás időbeli változásai között megfigyelhető enyhe késleltetés ugyanakkor jellegében megfelel a (3) összefüggéssel érintett sebesség-nyomás késleltetésnek.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a radonmozgás dinamikája a két barlangban jelentősen különbözik egymástól. Ezt, összhangban az elméleti megfontolásokkal, a barlangokat befoglaló kőzetek porózitásban és repedezettségében meglévő különbségeknek tulajdonítjuk.

Köszönetnyilvánítás

Ez a munka a 3005 és 2011 sz. OTKA valamint a Papp Ferenc és a Labirint Barlangkutató csoportok önzetlen támogatásával készült. Ezúton szeretnék köszönetet mondani nekik.

dr. Haki József
MTA Atommagkutató Intézet
Debrecen, Pf 51.
H-4001

IRODALOM

- ATKINSON, T.C. – SMART, P.L. – WIGLEY, T.M.L. (1983): Climate and natural radon levels in Castleguard cave, Columbia icefields, Alberta, Canada. – *Arctic and Alpine Research*, 15, p. 487–502.
- CSIGE I. – HAKI J. – GÉCZY G. – LÉNÁRT L. (1990): Study of underground radon transport. – *Proceedings of the International Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences*. Trieste, Italy, 1989. ed. L. Tomassino, G. Furlan, H.A. Khan et al. Singapore, World Scientific, p. 435–455.
- GÉCZY G. – CSIGE I. – SOMOGYI G. (1988): Air circulation in caves traced by natural radon. – *Proc. of the 10th Int Cong. on Speleology*. Budapest, ed. A. Kósa, Hungarian Speleological Society, p. 615–617.
- GÉCZY G. – HUNYADI I. – HAKI J. (1993): Long-term radon studies in the thermal karst region of Budapest. – *Proceedings of the Second Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental and/or Earth Sciences*. Trieste, Italy, 1989. eds. G. Furlan and L. Tomassino. Singapore, World Scientific, p. 269–273.
- HAKI J. – HUNYADI I. – CSIGE I. – GÉCZY G. – LÉNÁRT L. – TÖRÖCSIK I. (1992): Outline of natural radon occurrences on karstic terraces of Hungary. – *Rad. Prot. Dos.* 7, p. 183–186.
- HAKI J. (1993): Radontransport vizsgálatok (Radon transport studies), egyetemi doktori értekezés (PhD thesis, in Hungarian). – *Debrecen*.
- HOLL B. (1992): szóbeli közlés (personal communication)
- JANSSENS, A. – RAES, F. – POFFUN, A. (1984): Transients in the exhalation of radon caused by changes in ventilation and atmospheric pressure. – *Rad. Prot. Dos.* 7, p. 81–86.
- SOMOGYI G. – PARIPÁS B. – VARGA ZS. (1984): Measurement of radon, radon daughters and thoron concentrations by multidetector devices. – *Nucl. Tracks* 8, p. 487–489
- WIGLEY, T.M.L. (1967): Non steady flow through porous medium and cave breathing. – *Journal of Geoph. Res.* 72, p. 3199–3205

THE STUDY OF RADON TRANSPORT DYNAMICS BASED ON MONITORING IN THE VASS IMRE AND CSERSZEGTOMAJ WELL CAVES

In the conventional equations used to describe gaseous transport of radon isotopes through fractured porous media the two processes responsible for radon movement are diffusion and pressure-driven flow (advection). Fractures in porous medium can be especially effective for pressure-driven transport but lateral diffusion can have a strong mitigating influence. The interplay of diffusion and flow is studied on records from the Vass Imre and Cserszegtomaj well caves. From the measured continuous time series advection and/or diffusion control on the radon transport process is experimentally identified. The observed phenomena represent two special extreme cases of radon transport processes.

For the interpretation of the observed phenomena model calculations were performed to study the impact of the characteristic geometrical size of the conduits and fractures on forming the radon concentrations inside them. According to the calculations, differences found in control mechanism were attributed to the differences in local (geological) conditions.