

Monitorovanie variácií objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí vo vybraných objektoch v rámci územia Slovenskej republiky

AUGUSTÍN GLUCH a SILVESTER PRAMUKA

Štátny geologický ústav D. Štúra, regionálne centrum, Markušovská cesta 1,
052 01 Spišská Nová Ves;
augustin.gluch@geology.sk

Monitoring of radon volume activity variations in geological surroundings of selected objects in Slovak Republic

Numerous natural radionuclides and products of their radioactive decay are permanently present in all compounds of the environment. The radon volume activity (RVA) monitoring in geological surroundings aims to document and evaluate the long-term and short-term radon changes in the geological surroundings (soil gas) and groundwater. The radon volume activity is monitored in Bratislava, Banská Bystrica, Spišská Nová Ves and Hnilec, as well as above tectonic fault in locality Grajnár. The radon concentrations in the groundwater are monitored in objects where a higher content of radon volume activity was determined (Bratislava, Bacúch, Spišské Podhradie and Oravice). Results of the radon content monitoring in soil gas document its long term variability in subsurface parts of the rock environment throughout a year, but also during several monitoring seasons as well. The season variations of the radon volume activity depend not only on humidity and gas permeability of local soils and rocks, but also on geological setting and lithology in specific locality. The same meteorological conditions, but different geological environment cause the different nature of variations. The radon volume activity variations in the groundwater have a season nature. Monitoring during several seasons has manifested the wave or sinusoidal dependence. Contrary to the soil radon the variations are not so affected by accidental occurrences or changes in the atmosphere, and they are not so sensitive on variable short time changes of the weather (temperature, atmospheric pressure). Monitoring of the soil radon concentrations above tectonic fault documents a good correlation of measured results. The total values of the radon volume activity in soil gas during more seasons point to some differences, but the tendency of curves remains the same.

Key words: radon monitoring, volume activity of radon, radon variations, radon in soil gas, radon in the groundwater.

Úvod

Napriek skutočnosti, že ľudská populácia je permanentne vystavená účinkom ionizujúceho žiarenia, problematika prírodnej či umelej rádioaktivity bola desaťročia prakticky „tabu“. Urán bol strategickou surovinou pre jadrový (zbrojný, energetický) priemysel a výsledky prieskumov aj vedeckých výskumov z tejto oblasti sa (najmä v období tzv. „studenej vojny“) prísne utajovali. Zdravotné riziká a dosahy na obyvateľstvo sa bagatelizovali a vo všeobecnosti sa usudzovalo, že radón a dcérske produkty jeho jadrového rozpadu bezprostredne ohrozujú len baníkov v uránových baniach.

Vplyvmi expozície radónom sa v zahraničí zaoberajú viaceré renomované inštitúcie (napr. UNSCEAR – *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, ICRP – *International Commission on Radiological Protection*), ale aj ďalšie organizácie a vedecké pracoviská. Zo záverov ich výskumov vyplýva, že prírodné zdroje rádioaktívneho žiarenia prispievajú viac než tromi štvrtinami k celkovej radiačnej záťaži populácie (obr. 1).

Najvýznamnejším zdrojom prírodného žiarenia je radón a rádioizotopy vznikajúce pri jeho nukleárnom rozpade. Tie sú adsorbované v dýchacích cestách, kde dochádza ku kontaktnému ožarovaniu buniek pľúcneho tkaniva, čo môže v konečnom dôsledku viesť až k vzniku zhubných nádorov. Bolo to potvrdené napr. aj výskumami Slovenskej zdravotníckej univerzity (SZU) v Bratislave (Nikodemová, Pinter a Vičanová, 2003), zameranými na oblasti s prognózou vysokého radónového rizika.

Na Slovensku sa prírodnej rádioaktivity a riziku expozície radónom z geologického prostredia začala významnejšia pozornosť venovať až počiatkom 90. rokov minulého storočia, keď sa pri tvorbe regionálnych máp životného prostredia začali zostavovať aj mapy prírodnej rádioaktivity horninového prostredia (koncentrácia draslíka – ^{40}K , ekvivalentného uránu – eU, ekvivalentného tória – eTh; celková prírodná rádioaktivita – eUt; dávkový príkon žiarenia gama – Da), mapy prognózy radónového rizika (radón – ^{222}Rn v pôdnom vzduchu) a mapy prírodnej rádioaktivity podzemných a povrchových vôd – koncentrácia $U_{\text{nat}} = \text{zmes izotopov } ^{234}\text{U}, ^{235}\text{U} \text{ a } ^{238}\text{U}$, objemová aktivita rádia ^{226}Ra a ^{222}Rn (smernica MŽP SR

č. 1/2000-3). Sledovanie sezónnych resp. dlhodobějších zmien obsahov radónu v geologickom prostredí nebolo zámerom riešených úloh a variáciám objemovej aktivity radónu (OAR) nebola venovaná väčšia pozornosť.

Až v priebehu riešenia projektu „Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov (ČMS GF)“ sa riešitelia podsystemu „Monitoring objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí na území Slovenskej republiky“ začali systematicky venovať predmetnej problematike v regionálnom (celoslovenskom) rozsahu (Smolárová, 1998).

Charakteristika skúmanej problematiky

Celý rad prírodných rádionuklidov a produktov ich jadrového rozpadu je permanentne prítomný vo všetkých zložkách životného prostredia, t. j. v horninách, vodstve i v ovzduší. Radón (^{222}Rn – zdroj alfa žiarenia s polčasom rozpadu 3,825 dňa) je inertný prírodný rádioaktívny plyn vznikajúci samovolným rozpadom rádia ^{226}Ra (zdroj alfa a gama žiarenia) v rozpadovom rade uránu ^{238}U a patrí

medzi tzv. vzácne plyny. Má vyššiu hustotu než vzduch, je veľmi dobre rozpustný vo vode (až 51 % svojho objemu), je bez farby, chuti a zápachu.

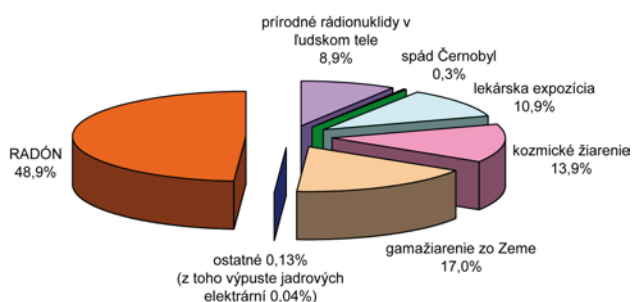
Hlavným zdrojom prírodného radónu je geologické prostredie, t. j. niektoré minerály a horniny, ale aj podzemné vody prechádzajúce horninami so zvýšeným obsahom uránu. Vzhľadom na polčas rozpadu materských prvkov (^{238}U = cca 4,5 mld. rokov, ^{226}Ra = 1 600 rokov) je z geologického prostredia zaistený jeho trvalý prísun.

Radón pomerne ľahko preniká horninovým prostredím a šíri sa difúziou, resp. konvekčným prúdením. Difúzia je ovplyvňovaná hlavne plynopriepustnosťou horninového prostredia. Transport radónu konvekciou je rádovo vyšší a spôsobujú ho zmeny fyzikálnych podmienok prostredia (teplotné a tlakové gradienty). Najvýznamnejší prejav konvekcie je nad tektonicky porušenými zónami, ktoré sú dobrými komunikačnými cestami pre plyny.

Vo voľnom prostredí sa radón rýchlo riedi atmosférickým vzduchom, ale v uzavretých priestoroch sa môže nahromadiť vo vysokej, zdraviu škodlivej koncentrácii.

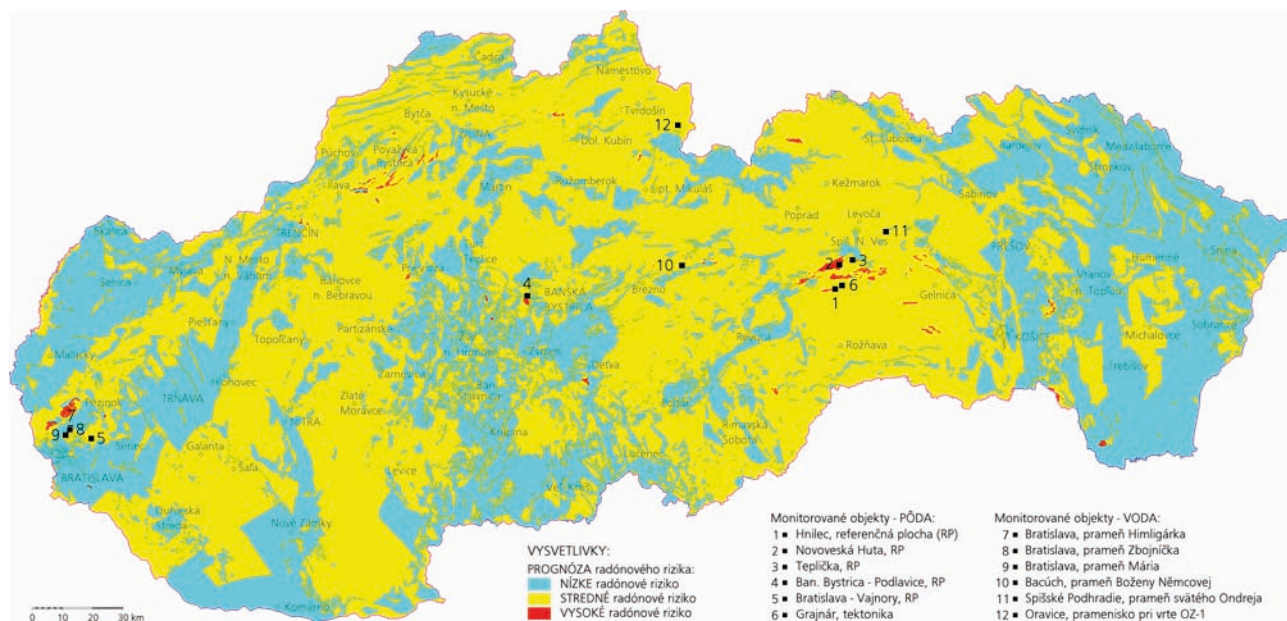
Pre potreby monitorovania OAR v rámci územia Slovenska bol jedným z dôležitých východísk výber lokalít. Vychádzalo sa jednak z analýzy výsledkov starších geologickoprieskumných prác zaoberajúcich sa problematikou prírodnej rádioaktivity (napr. prieskum zameraný na rádioaktívne suroviny), ale aj novších údajov a podkladov získaných napr. pri hodnotení geologických faktorov životného prostredia (Čížek, Smolárová a Gluch, 2001).

Monitorovanie zmien OAR v pôdnom vzduchu bolo zamerané na areály s potvrdeným zvýšeným (stredným a vysokým) radónovým rizikom. Najviac lokalít sa vytýpovalo v oblasti Spišsko-gemerského rudohoria, ktoré má najvyšší počet lokalít s vysokou koncentráciou pôdneho radónu na území Slovenska a je to zároveň región



Obr. 1. Radiačná záťaž obyvateľstva (zdroj: www.suro.cz).

Fig. 1. Radiation load of population (source: www.suro.cz).



Obr. 2. Situačná schéma monitorovaných objektov na podklade mapy prognózy radónového rizika (Gluch, Dzurenda a Pramuka, 2011).

Fig. 2. Situation scheme of monitoring objects on the basis of the Map of Radon Risk Prognosis (Gluch, Dzurenda and Pramuka, 2011).

s početnými výskytmi uránovej mineralizácie, vrátane uránových ložísk.

Výber lokalít na účely merania aktivít pôdneho radónu na referenčných plochách (RP) bol prednostne zameraný do intra(extra)vilánov vybraných sídiel: Bratislava, Banská Bystrica, Spišská Nová Ves (lokality Novoveská Huta a Teplička) a Hnilec.

Posudzovanie zmien koncentrácie radónu v podzemných vodách je realizované v objektoch (dostupné pramene, vývery a pod.), v ktorých boli pri predošlých prácach zistené zvýšené, resp. vysoké objemové aktivity radónu (Lučivjanský, 1993).

Z približne troch desiatok objektov, ktoré boli pri riešení predmetnej úlohy v rôznom rozsahu monitorované od roku 1998, je v súčasnosti sledovaných 12 objektov (obr. 2) – po šesť objektov pre pôdny radón (z toho jeden nad zlomom) a radón vo vodách.

Monitorovanie viacerých objektov bolo ukončené, na určitú dobu prerušené, prípadne čiastočne upravené v dôsledku znefunkčnenia monitorovaných miest nepredvídanou antropogénnou činnosťou (terénne úpravy, výstavba, znečisťovanie plôch divokými skládkami a pod.).

Metodika prác

Cielom monitoringu OAR v geologickom prostredí vo vybraných objektoch na území SR je zdokumentovanie a zhodnotenie krátkodobých (sezónnych), ale aj dlhodobých (rádovo až desiatky rokov) zmien koncentrácie radónu v horninovom prostredí (pôdny vzduch) a v podzemných vodách.

Súbor geofyzikálnych prác a činností realizovaných v skúmaných objektoch počas ostatných 10 sezón (obdobie 2002 – 2011) predstavuje opakované vzorkovanie a meranie OAR v terénnych aj laboratórnych podmienkach celkovo v 12 lokalitách (obr. 2), vrátane ich komplexného spracovania, vyhodnotenia a porovnania výsledkov s predchádzajúcimi obdobiami, vypracovania jednotlivých hodnotiacich správ, aktualizovania výsledných databáz a pod. (Smolárová a Gluch, 2010).

Radón v pôdnom vzduchu je v každej lokalite monitorovaný v rámci referenčnej plochy (RP), ktorú tvoria jednotlivé body (sondy pre odber vzoriek pôdneho vzduchu) usporiadané v profiloch, resp. v nepravidelnej sieti, na ploche do cca 400 m². Základný počet bodov v rámci RP je 17 sond (16 sond základného merania plus jedna kontrolná sonda), čo predstavuje minimálny štatistický súbor na zhodnotenie radónového rizika RP pri každom monitorovaní.

Pôdny vzduch pre stanovenie OAR sa odoberá cez ručne zatíkané sondy z hĺbky cca 80 cm. Vzorka sa nasaje do deemanovanej a evakuovanej scintilačnej Lucasovej komory (LK – kalibrovaný scintilačný detektor, objem 125 ml), ktorá sa po odbere v teréne transportuje na meranie v laboratórnych podmienkach. Pri odbere pôdneho radónu sa (okrem údajov nevyhnutných na stanovenie hodnoty OAR) zaznamenávajú aj ďalšie doplňujúce údaje: počasie, zrážky, teplota pôdy v hĺbke 10 cm, pri zemi a vo vzduchu

vo výške 1 m, atmosférický tlak, kvalitatívne posúdenie vlhkosti pokryvných sedimentov v areáli RP, obťažnosť hĺbenia sond a odberu pôdneho vzduchu.

Vzorky podzemných vôd na stanovenie objemovej aktivity ²²²Rn sú odoberané do sklenených vzorkovní so zabrušeným hrdlom doplna (objem cca 300 ml), bez vzduchovej bubliny. Pri odbere je meraná okamžitá hodnota teploty vody a vzduchu, výdatnosť zdroja, atmosférický tlak, meteorologické podmienky pri odbere, vrátane údajov potrebných pri výpočte OAR.

V laboratórnych podmienkach je radón z každej vzorkovnice prebublávaný cez premývačku do štyroch deemanovaných a evakuovaných LK s objemom 600 ml, ktoré sa následne merajú kalibrovaným meracím zariadením postupom zhodným s meraním OAR v pôdnom vzduchu. Za účelom vylúčenia náhodnej chyby sa merajú vždy dve vzorky, pričom výsledný obsah radónu je ich aritmetický priemer. Tretia vzorka býva analyzovaná v prípade, ak rozdiel dvojice meraní prekročí 10 %.

Spôsob stanovenia OAR v pôdnom vzduchu a plyno-priepustnosti základových pôd je určený schválenou metodikou, ktorá je v súlade s ustanoveniami zákona č. 355/2007 o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia, a taktiež v zmysle vyhlášky MZ SR č. 528/2007, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o požiadavkách na obmedzenie ožiarovania z prírodného žiarenia.

Pri stanoveniach OAR sa používa kalibrované a metrologicky overené meracie zariadenie typu LUK-4A (výrobca RADON, v. o. s., Praha, ČR), využívajúce princíp scintilačnej detekcie alfa častíc v Lucasových komorách.

Merania odobratých vzoriek zmesi plynov (radón z pôdneho vzduchu, resp. zo vzorky vody v zmesi s atmosférickým vzduchom) v LK sú realizované v laboratórnych podmienkach najskôr 210 minút po ich napustení, t. j. po dosiahnutí rádioaktívnej rovnováhy medzi ²²²Rn a dcérsymi produktmi jeho rozpadu.

Objemová aktivita radónu (c_A) v pôdnom vzduchu sa vypočítava podľa vzťahu:

$$c_A = (N_v - N_p) / k \cdot V \cdot (3 \cdot t_v \cdot e^{-\lambda \cdot t_r}) \quad [\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}],$$

kde

N_v – nameraný počet impulzov vzorky zmesi plynov v LK za čas t_v ,

N_p – nameraný počet impulzov pozadia LK za čas t_v ,

k – koeficient účinnosti meracieho zariadenia,

V – objem vzorky zmesi plynov v LK [litre],

t_v – čas merania vzorky zmesi plynov v LK [sec],

t_r – čas od odberu pôdneho vzduchu do LK do začiatku merania [min],

λ – rozpadová konštanta ²²²Rn.

Radónové riziko RP je hodnotené v zmysle novelizovanej Smernice MŽP SR (v súčasnosti prebieha jej schvaľovanie) a podľa prílohy č. 7 k nariadeniu vlády SR č. 350/2006, kde sú odporúčané hranice pre stanovenie kategórií radónového rizika na základe kvantitatívneho posúdenia nameranej OAR v pôdnom vzduchu a priepustnosti zemín pre plyny (tab. 1).

Plynopriepustnosť miestnych zemín a hornín sa pre každú RP určila skrátenou granulometrickou analýzou odobratej vzorky na základe percentuálneho podielu

Tab. 1

Stanovenie kategórie radónového rizika referenčnej plochy
Determination of the reference area radon risk category

KATEGÓRIA RADÓNOVÉHO RIZIKA	3. kvartil - OBJEMOVÁ AKTIVITA RADÓNU [kBq.m ⁻³]		
	Plynopriepustnosť zemin		
	malá	stredná	dobrá
nízke – I	< 30	< 20	< 10
stredné – II	30 – 100	20 – 70	10 – 30
vysoké – III	> 100	> 70	> 30

jemných častíc f (priemer častíc < 0,06 mm) v zmysle tab. 2.

Objemová aktivita radónu vo vode (c_A) sa počíta podľa vzťahu:

$$c_A = (N_v - N_p) / k \cdot V_v \cdot (3 \cdot t_v \cdot e^{-\lambda t_r}) \cdot e^{-\lambda t_F} \quad [\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}],$$

kde

V_v – objem vzorky vody v premývačke [litre],

$e^{-\lambda t_F} = F(t_F)$ – koeficient vyjadrujúci pokles aktivity ²²²Rn za dobu t_F .

Tab. 2

Stanovenie plynopriepustnosti pôd
Determination of the soil gas permeability

Priepustnosť	Podiel jemných častíc	Trieda podľa STN 73 1001
malá	$f > 65 \%$	F5, F6, F7, F8
stredná	$15 \% < f < 65 \%$	F1, F2, F3, F4, S4, S5, G4, G5
dobrá	$f < 15 \%$	S1, S2, S3, G1, G2, G3

Tab. 3

Smerné hodnoty na vykonanie opatrení
Guide values for the implementation of measures

Druh dodávanej vody	Celková objemová aktivita alfa [Bq.l ⁻¹]	Celková objemová aktivita beta [Bq.l ⁻¹]	Objemová aktivita ²²² Rn [Bq.l ⁻¹]
Pramenná voda „vhodná na prípravu stravy pre dojčatá“	0,1	0,2	20
Prírodná minerálna voda	1,0	2,0	100
Pramenná voda, balená pitná voda, pitná voda	0,2	0,5	100

Ostatné premenné sú vysvetlené pri výpočte OAR v pôdnom vzduchu.

Vyhláška MZ SR č. 528/2007 o. i. udáva aj smerné hodnoty na vykonanie opatrení (tab. 3), ktoré sú základnými ukazovateľmi pri posudzovaní vhodnosti dodávanej vody z hľadiska prírodnej rádioaktivity. Parametre stanovené uvedenou vyhláškou sú uplatňované pri vyhodnocovaní výsledkov stanovení OAR vo vodách.

Prehľad a výsledky realizovaných prác

Pôdny radón na referenčných plochách (RP)

Monitoring OAR v pôdnom vzduchu na RP bol v hodnotenom období (roky 2002 – 2011) vykonávaný

Tab. 4

Vývoj hodnôt OAR v pôdnom vzduchu a v podzemných vodách za obdobie 2002 – 2011
Progress of radon volume activity values in soil gas and groundwater in 2002–2011

p.č.	LOKALITA	Rok										Dlhodobý priemer	σ
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011		
		3.Q c _A [kBq.m ⁻³]											
Pôdny radón na referenčných plochách													
1	Hnílec	491	420	491	587	485	642	712	620	524	430	540	305
2	Novoveská Huta	89	58	87	99	113	73	61	67	66	71	78	73
3	Teplička	76	56	80	92	81	79	77	62	78	59	74	30
4	Banská Bystrica - Podlavice				118	111	80	69	53	120	43	85	52
5	Bratislava - Vajnory				67	59	52	43	36	69	31	51	21
Pôdny radón na tektonike													
6	Grajnár	18	10	13	24	20	16	20	16	*)	**)	17	18

Priemerné úhrny zrážok na Slovensku v [mm] a [%] dlhodobého priemeru	861	573	851	938	776	894	860	890	1255	656	[mm]
	106	75	112	125	101	122	112	122	157	80	[%]

p.č.	LOKALITA	Rok										Dlhodobý priemer	σ
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011		
		c _A [Bq.l ⁻¹]											
Radón vo vodách													
7	Bratislava - prameň Himligárka	158	163	133	161	125	208	156	175	173	194	165	33
8	Bratislava - prameň Zbojnička	242	230	191	205	178	291	254	288	220	294	239	50
9	Bratislava - prameň Mária	34	28	27	28	29	40	36	34	33	33	32	5
10	Bacúch - prameň Boženy Němcovej	259	238	254	256	222	257	299	250	344	295	267	69
11	Spišské Podhradie - prameň sv. Ondreja	137	143	156	154	140	180	198	187	188	195	168	45
12	Oravice - pramenisko Jašterčie OZ-1					536	1112	1217	1115	966	1070	1003	255

Kde:

3.Q c_A stredná hodnota tretieho kvartilu OAR v pôdnom vzduchu za hodnotený rok

c_A stredná hodnota OAR v podzemnej vode za hodnotený rok

σ štandardná odchýlka OAR zo všetkých jednotlivých meraných hodnôt celého súboru

v danom roku nebol objekt monitorovaný

* monitorovaná lokalita Grajnár dočasne neprístupná (skládka dreva)

** monitorovanie na objekte dočasne prerušené

s rôznou frekvenciou v piatich lokalitách, pozícia ktorých je znázornená na obr. 2. Prehľad a porovnanie výsledkov meraní OAR v pôdnom vzduchu v jednotlivých lokalitách, objektoch a monitorovacích sezónach je v tab. 4.

Referenčná plocha Hnilec, založená cca 2,1 km JJZ od centra rovnomennej obce pri štátnej ceste č. 533 Spišská Nová Ves – Gemerská Poloma, je dlhodobo hodnotená až v extrémne vysokom radónovom riziku, litologicky viazanom na zvetraný stredno-hrubozrnný gemeridný (tzv. „hnilecký“) granit s anomálnymi obsahmi uránu (podľa terénnej spektrometrie gama cca 20 ppm eU – Čížek, 1976, 1986) a patrí medzi horniny s najvyššou rádioaktivitou v oblasti Západných Karpát.

Monitorovanie OAR v pôdnom vzduchu tu býva realizované 4x v roku, každé dva mesiace, v období marec/apríl až september/október. Najvyššie priemerné hodnoty $OAR_{3,Q}$ (tretí kvartil OAR) boli zistené v období leto – jeseň ($653 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$), najnižšie pri jesenných monitoringoch ($467 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, obr. 3). V októbri 2005 tu bola nameraná najvyššia hodnota OAR v jednotlivej sonde ($1\,861 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$), čo je maximum nielen v tomto objekte, ale – podľa dostupných údajov – ide zrejme o doposiaľ najvyšší obsah radónu v pôdnom vzduchu zaznamenaný na území Slovenska. OAR radónu v pôdnom vzduchu na RP Hnilec sú značne variabilné ($13 - 1\,861 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$), pri štandardnej odchýlke $\sigma = 305 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. 4) zo všetkých jednotlivých meraní OAR (678 sond).

Priebeh variácií OAR v pôdnom vzduchu na RP Hnilec po jednotlivých sezónach vykazuje určitý „vlnový“ charakter. Kým minimálne hodnoty OAR zodpovedajú sezónam s nízkymi zrážkovými úhrnmi ($OAR_{2003} = 420 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, resp. $OAR_{2011} = 430 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$), opačne to v plnom rozsahu nebolo preukázané. Lokálne maximum $OAR_{3,Q}$ zo sezóny 2005 ($587 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) síce zodpovedá zvýšenému množstvu zrážok, ale pre mimoriadne vlhký rok 2010 (zdroj: www.shmu.sk) to už neplatí, obsahy pôdného radónu boli dokonca pod úrovňou dlhodobého priemeru (tab. 4).

Po doterajšom maxime zo sezóny 2008 ($712 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) tu hodnoty $OAR_{3,Q}$ v pôdnom vzduchu v rokoch 2009

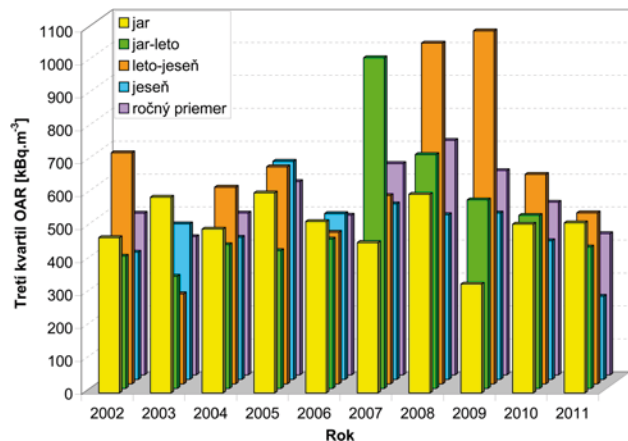
až 2011 vykazujú výrazný systematický pokles (trend $OAR_{2011/2008} = 0,60$). Na RP Hnilec je to doposiaľ najdlhšie obdobie s medziročne zdokumentovaným poklesom obsahu pôdného radónu od roku 2002.

Referenčná plocha Novoveská Huta je situovaná na JZ okraji rovnomennej obce pozdĺž miestnej obecnej komunikácie (od kostola smerom na Rybníky). Založená je v prostredí budovanom pestrofarebnými pieskovecami a bridlicami – strážanské vrstvy novoveského súvrstvia (perm) s väzbou na zlomovú líniu smeru SSV – JJZ.

Monitorovanie OAR v pôdnom vzduchu tu bolo realizované 6x – 8x v priebehu roka, v mesačných intervaloch v období skorej jari až neskorej jesene. V letných mesiacoch je v tomto objekte zaznamenávaná vysoká ($OAR_{3,Q}$ až $188 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) a na jar a neskorej jesen nízka (do $17 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) koncentrácia pôdného radónu (obr. 4). Maximálna OAR v jednotlivej sonde tu bola zaznamenaná v júli 2006 ($670 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$).

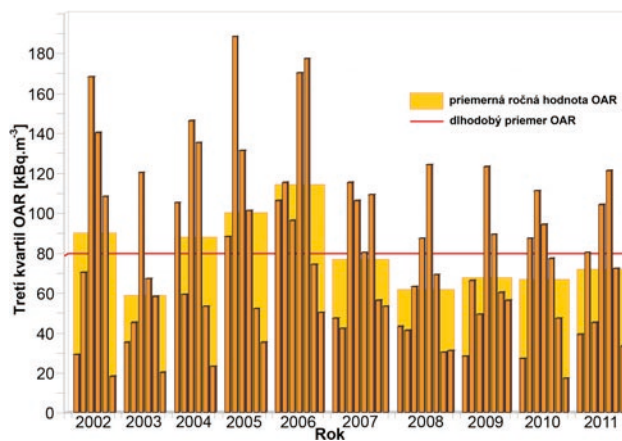
Po doterajšom maxime $OAR_{3,Q}$ z roku 2006 ($113 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) došlo v dvoch po sebe nasledujúcich sezónach k výraznému poklesu obsahu pôdného radónu (trend $OAR_{2008/2006} = 0,54$) a v ďalších rokoch už hodnoty OAR v areáli RP varírovali pod úrovňou dlhodobého priemeru ($78 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, tab. 4). Vo veľmi suchom roku 2011 (úhrn zrážok iba 656 mm) tu však paradoxne došlo k miernemu nárastu koncentrácie pôdného radónu. Zo všetkých monitorovaných objektov to bolo zaznamenané iba na tejto RP.

Medzi dôležité a významné výsledky monitorovania obsahu pôdného radónu patrí pozorovaný jav prudkého poklesu OAR (niekedy až na úroveň nízkeho radónového rizika), ktorý sa na RP Novoveská Huta prejavuje za rovnakých podmienok – pri prvých mrazoch na jeseň, prípadne aj pri prízemných mrazoch na jar (pri nepremrznutej pôde). Pravdepodobne v dôsledku zvýšeného teplotného gradientu medzi pôdnym a atmosférickým vzduchom radón intenzívnejšie uniká do atmosféry, čím dochádza k významnému zníženiu jeho obsahu v pokryvných sedimentoch (Smolárová a Gluch, 2010).



Obr. 3. Monitoring OAR v pôdnom vzduchu, obdobie 2002 – 2011, RP Hnilec.

Fig. 3. Radon volume activity monitoring in soil gas, 2002–2011, reference area Hnilec.



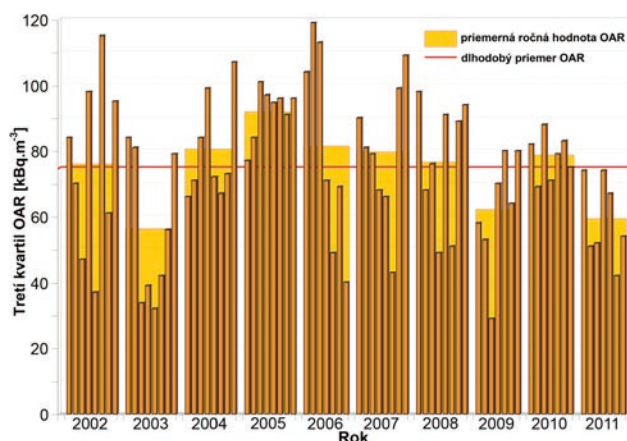
Obr. 4. Monitoring OAR v pôdnom vzduchu, obdobie 2002 – 2011, RP Novoveská Huta.

Fig. 4. Radon volume activity monitoring in soil gas, 2002–2011, reference area Novoveská Huta.

Referenčná plocha Teplička je lokalizovaná približne 2,8 km južne od centra Spišskej Novej Vsi v lokalite Šulerloch (podľa rovnomennej kóty 646 m). Podložie RP je budované sedimentmi paleogénu (bridlice, pieskovce) s vyšším podielom ílovej frakcie.

Monitoring v tejto lokalite prebiehal v mesačných intervaloch v období skorá jar až neskorá jeseň. Napriek tomu, že objekt sa monitoruje v ten istý deň ako cca 5 km vzdialená RP Novoveská Huta, priebeh variácií koncentrácie pôdneho radónu je výrazne odlišný. Zvýšené hodnoty sú tu zaznamenávané zväčša na jar a jeseň ($OAR_{3,Q} = 119 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) a nízke v letných mesiacoch ($OAR_{3,Q} = 27 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, obr. 5). V jednotlivej sonde bola najvyššia hodnota ($196 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) nameraná v máji v sezóne 2005.

Variácie obsahu pôdneho radónu na RP Teplička po jednotlivých monitorovacích sezónach majú určitý „kvázisínusoidálny“ priebeh, pričom minimálne hodnoty OAR zodpovedajú sezónam s nízkymi zrážkovými úhrnmi ($OAR_{2003} = 56 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, $OAR_{2011} = 59 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$). Po doterajšom maxime zo sezóny 2005 ($92 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) tu hodnoty $OAR_{3,Q}$ v pôdnom vzduchu v rokoch 2006 až 2011 (s výnimkou mimoriadne vlhkého roku 2010) vykazujú pomerne výrazný systematický pokles (tab. 4).



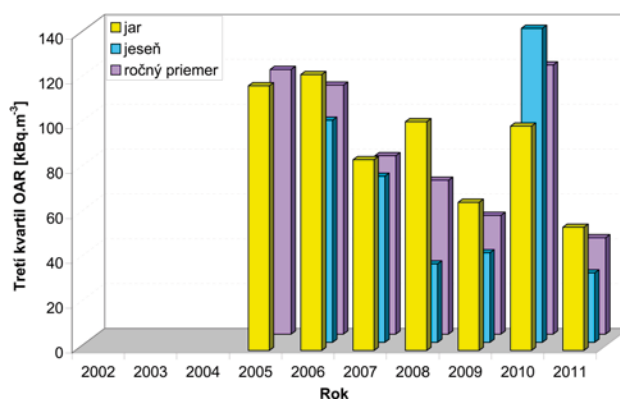
Obr. 5. Monitoring OAR v pôdnom vzduchu, obdobie 2002 – 2011, RP Teplička.

Fig. 5. Radon volume activity monitoring in soil gas, 2002–2011, reference area Teplička.

Referenčná plocha Banská Bystrica-Podlavice je založená na SZ okraji Banskej Bystrice (časť Podlavice), po obidvoch stranách poľnej cesty, neďaleko záhradkárskej (chatovej) kolónie.

Podložie RP tvoria ramsauské dolomity s anomálnymi hodnotami koncentrácie uránu – tzv. „uránové dolomity“ (Čížek, 1986). Monitorovanie OAR v pôdnom vzduchu sa tu uskutočňovalo dvakrát v priebehu roka (jar a jeseň).

V tomto objekte dochádza od roku 2005 (výnimkou je mimoriadne vlhké obdobie sezóny 2010) k postupnému a veľmi výraznému poklesu úrovni OAR (trend $OAR_{2005/2011} = 0,36$), pozorovateľnému najmä pri jesenných monitoringoch (obr. 6). Extrémne úrovne $OAR_{3,Q}$, t. j. maximum ($120 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) a minimum ($43 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$), boli dosiahnuté v dvoch po sebe nasledujúcich sezónach 2010 a 2011,



Obr. 6. Monitoring OAR v pôdnom vzduchu, obdobie 2005 – 2011, RP Banská Bystrica-Podlavice.

Fig. 6. Radon volume activity monitoring in soil gas, 2005–2011, reference area Banská Bystrica-Podlavice.

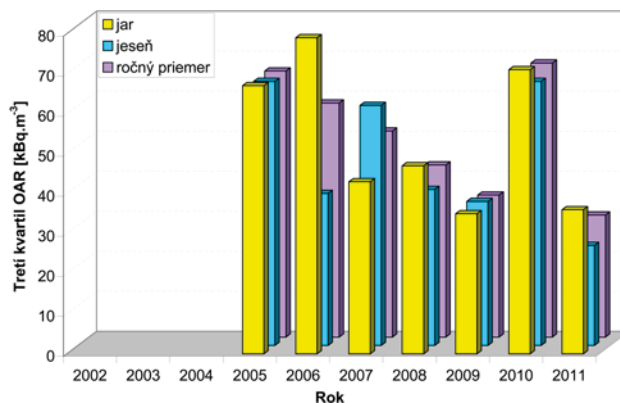
charakterizovaných mimoriadne vysokými, resp., naopak, veľmi nízkymi zrážkovými úhrnmi (tab. 4).

Vyššia koncentrácia pôdneho radónu je tu v priemere zaznamenávaná pri jarom monitorovaní ($OAR_{3,Q} = 93 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) a nižšia na jeseň ($OAR_{3,Q} = 70 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$). Najvyšší obsah radónu v pôdnom vzduchu v jednotlivej sonde ($272 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) bol zistený v máji počas sezóny 2006.

Referenčná plocha Bratislava-Vajnory je lokalizovaná na SV okraji rovnomennej mestskej časti Bratislavy, pozdĺž melioračného kanála približne smeru S – J. Založená je v prostredí pomerne dobre plynopriepustných fluvialnych holocénnych sedimentov (piesčité až štrkovité hliny).

Monitoring OAR v pôdnom vzduchu v oblasti RP Bratislava-Vajnory je realizovaný od sezóny 2005 dvakrát v roku (jar a jeseň). V objekte sa v období 2005 – 2011 (s výnimkou mimoriadne vlhkej sezóny 2010) postupne, no výrazne (trend $OAR_{2011/2005} = 0,46$) znižujú priemerné ročné úrovne OAR (obr. 7). V jednotlivej sonde tu bol zaznamenaný maximálny obsah pôdneho radónu ($122 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) v máji počas sezóny 2005.

Podobne ako na RP Banská Bystrica-Podlavice, aj tu boli extrémne úrovne $OAR_{3,Q}$ v pôdnom vzduchu



Obr. 7. Monitoring OAR v pôdnom vzduchu, obdobie 2005 – 2011, RP Bratislava-Vajnory.

Fig. 7. Radon volume activity monitoring in soil gas, 2005–2011, reference area Bratislava-Vajnory.

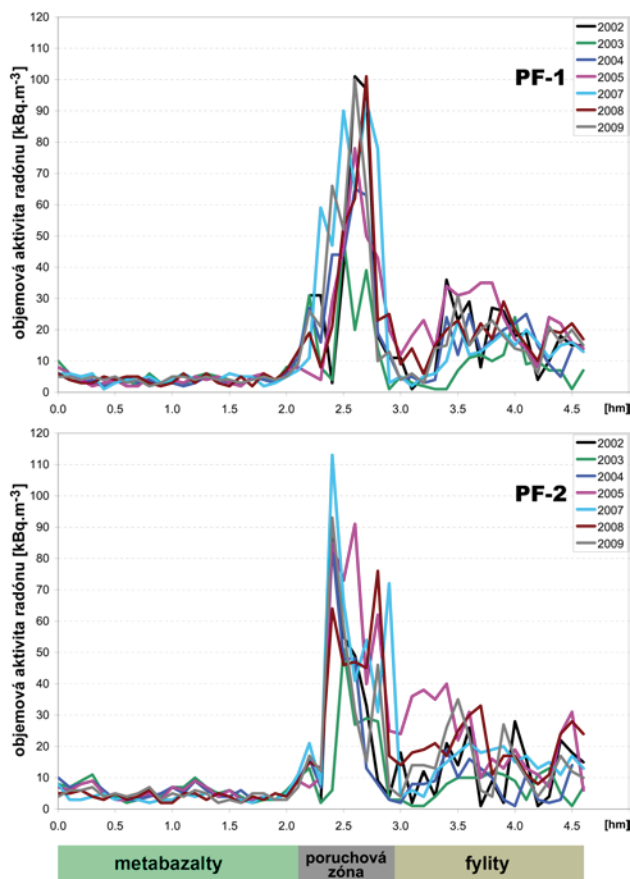
(zodpovedá zrážkovým úhrnom) zaznamenané v dvoch po sebe nasledujúcich sezónach ($OAR_{2010} = 69 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, resp. $OAR_{2011} = 31 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$).

Pôdny radón na zlome

Geofyzikálne profily v **lokalite Grajnár** sú založené cca 2,1 km východne od obce Hnilec a asi 400 m východne od kóty Holičky (1 086 m). Monitorovacie profily (smer SZ – JV) prebiehajú nad tektonickým kontaktom (smer Z – V) metabazaltových tufov a tuftitov sykavského súvrstvia s kremennými fylitmi, s metamorfovanými pieskovecami smrečinského súvrstvia (Slovenské rudohorie, rakovecká skupina).

Merania OAR v pôdnom vzduchu sú tu realizované raz ročne na dvoch paralelných profiloch s dĺžkou 460 m (vzdialenosť profilov cca 10 m, krok odberu vzoriek pôdneho vzduchu 10 m), okrem sezón 2010 a 2011, keď nebolo možné vykonať odbery pôdneho radónu z objektívnych príčin.

Na obr. 8 je graficky znázornený priebeh koncentrácie pôdneho radónu pozdĺž týchto profilov pre monitorovacie sezóny 2002 – 2009, ktoré názorne dokumentujú úroveň hodnôt OAR v pôdnom vzduchu a veľmi dobrú vzájomnú



Obr. 8. Monitoring OAR v pôdnom vzduchu, obdobie 2002 – 2009, lokalita Grajnár.

Fig. 8. Radon volume activity monitoring in soil gas, 2002–2009, locality Grajnár.

koreláciu výsledkov meraní nad tektonickou dislokáciou. Absolútne hodnoty $OAR_{3,Q}$ dlhodobo vykazujú určité rozdiely (tab. 4), avšak celkový priebeh a charakter kriviek sa zachováva. Najvyššia hodnota OAR v pôdnom vzduchu v jednotlivej sonde tu bola vysledovaná v sezóne 2007 ($113 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$). Keďže horniny rakoveckej skupiny Slovenského rudohoria sa ako celok vyznačujú nízkou prírodnou rádioaktivitou, zdroj radónu je zrejme v ich podloží.

Radón vo vodách

Rádiohydrochemické vzorkovanie a monitorovanie OAR v podzemných vodách sa v rokoch 2002 – 2011 realizovalo s rôznou frekvenciou v šiestich lokalitách (obr. 2). Prehľad a porovnanie výsledkov meraní koncentrácie radónu v podzemných vodách v jednotlivých lokalitách, objektoch a monitorovacích sezónach dokumentujeme v tab. 4.

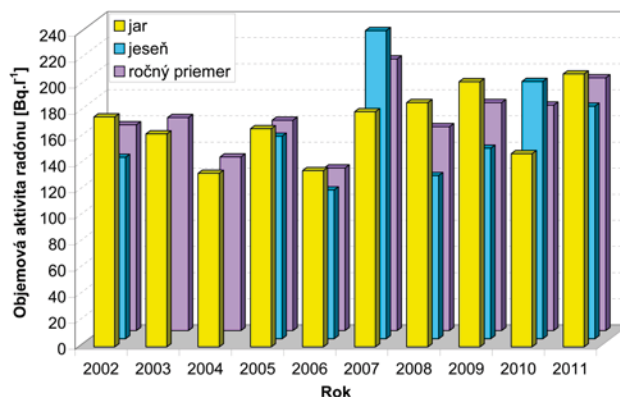
V oblasti Malých Karpát (cca 9 km severne od centra Bratislavy) sú dvakrát do roka (jar a jeseň) monitorované pramene Himligárka, Zbojnička a Mária (Máriin prameň). Zachytené a stavebne upravené pramene sú viazané na kyslé prostredie kryštalínika Malých Karpát (leukokrátne muskovitické a dvojsludné granity, granodiority, bratislavský typ). Podzemné vody sú tu viazané na porušené zóny, v ktorých sú dobré podmienky na vznik a šírenie radónu.

Prameň Himligárka je približne 30 m od tzv. Štefánikovej magistrály a asi 600 m SSV od kóty Horný Červený Kríž.

Zvýšená koncentrácia ^{222}Rn je tu v priemere zaznamenávaná na jar ($170 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$) a nižšia v jesennom období ($161 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$). Najvyšší obsah radónu ($236 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$) bol vysledovaný pri jesennom monitoringu v sezóne 2007 (obr. 9). Výdatnosť prameňa kolíše v širokom rozmedzí $0,01$ až $1,82 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, pričom na jeseň 2003 a 2004 bol prameň dokonca vyschnutý. Najvyššia výdatnosť bola zistená na jar 2010, t. j. v sezóne s veľmi vysokými zrážkovými úhrnmi.

Prameň Zbojnička je vzdialený cca 800 m od prameňa Himligárka a približne 270 m západne od kóty Horný Červený Kríž.

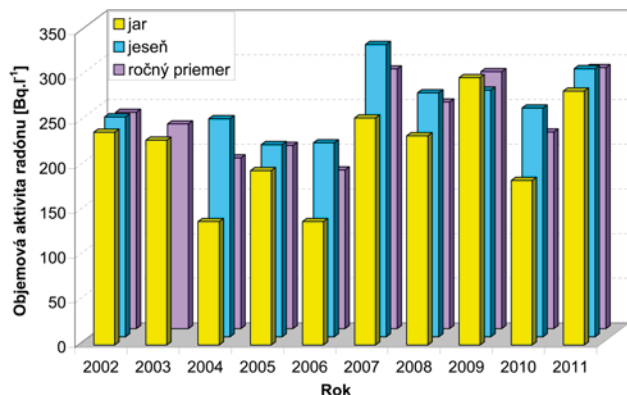
Vyššie objemové aktivity radónu sú tu v priemere zaznamenávané skôr na jeseň ($262 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$), než na jar



Obr. 9. Monitoring OAR v podzemných vodách, obdobie 2002 až 2011, prameň Himligárka (Malé Karpaty).

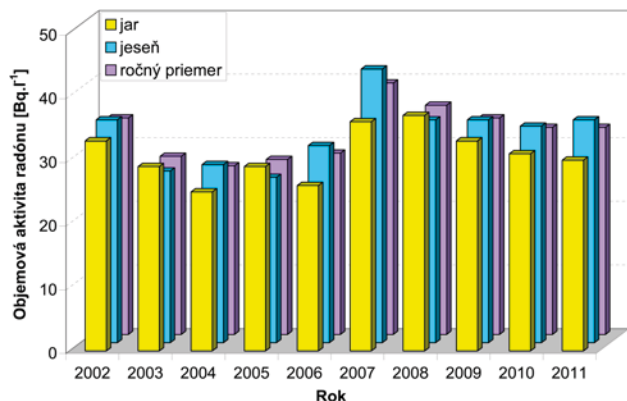
Fig. 9. Radon volume activity monitoring in groundwater, 2002–2011, spring Himligárka (Malé Karpaty Mts.).

($219 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$), pričom maximálna OAR ($327 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$) bola zistená na jeseň roku 2007 (obr. 10). Výdatnosť prameňa varíruje v širokom rozsahu – $0,04$ až $3,33 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, pričom v extrémne suchom roku 2003, na jeseň, bol prameň



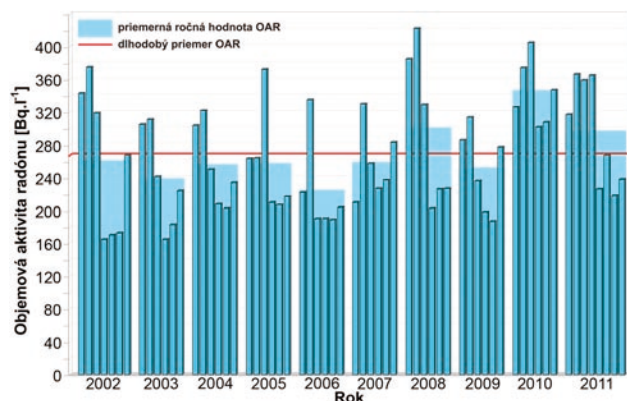
Obr. 10. Monitoring OAR v podzemných vodách, obdobie 2002 až 2011, prameň Zbojnička (Malé Karpaty).

Fig. 10. Radon volume activity monitoring in groundwater, 2002–2011, spring Zbojnička (Malé Karpaty Mts.).



Obr. 11. Monitoring OAR v podzemných vodách, obdobie 2002 až 2011, prameň Mária (Malé Karpaty).

Fig. 11. Radon volume activity monitoring in groundwater, 2002–2011, spring Mária (Malé Karpaty Mts.).



Obr. 12. Monitoring OAR v podzemných vodách, obdobie 2002 až 2011, Prameň Boženy Němcovej (Bacúch).

Fig. 12. Radon volume activity monitoring in groundwater, 2002–2011, spring Prameň Boženy Němcovej (Bacúch).

vyschnutý. Najvyššia výdatnosť tohto zdroja bola nameraná na jar 2010.

Na **prameni Mária**, vzdialenom cca 800 m od prameňa Himligárka a asi 270 m západne od kóty Horný Červený Kríž, je dlhodobozaznamenávaný pomerne nízky obsah ^{222}Rn , v dlhodobom priemere nepatrne vyšší pri jesennom monitoringu ($33 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$) oproti jarnému ($31 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$). Najvyššia úroveň OAR ($43 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$) bola nameraná na jeseň sezóny 2007 (obr. 11). Výdatnosť zdroja kolíše v intervale $0,03$ až $1,11 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, s maximálnou výdatnosťou na jar roku 2006.

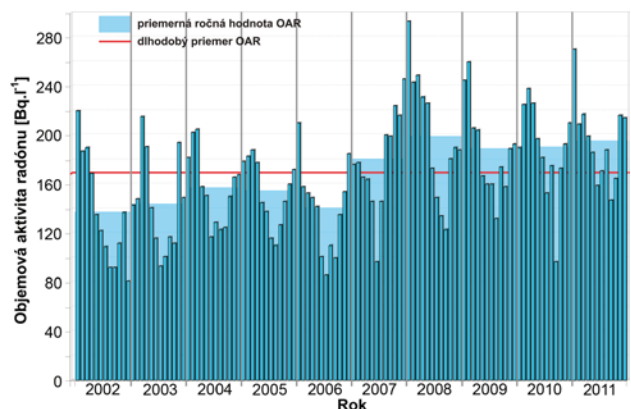
Prameň Boženy Němcovej, lokalizovaný cca 1,4 km severne od centra obce Bacúch, bol v hodnotenom období monitorovaný 6x – 8x ročne. Zachytený a stavebne upravený prameň vyviera na povrch v prostredí granatiticko-muskoviticko-biotitických pararúl, svorových rúl až svorov. Predpokladáme, že zdrojom radónu sú porušené, emanačne schopné zóny kryštalinika Nízkych Tatier.

Vo vode predmetného zdroja bol zistený zvýšený až vysoký obsah rádia ^{226}Ra (v období 1998 – 2000 bol predmetom monitoringu), ktorý nebol stabilný a varíroval v rozsahu cca $0,5$ – $1,8 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ bez korelácie na koncentráciu ^{222}Rn vo vode.

Obsah radónu v priebehu ostatných 10. sezón bol značne variabilný a pohyboval sa v rozmedzí 165 až $422 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$, pričom najvyššia hodnota bola nameraná v apríli 2008 (obr. 12), pri dlhodobom priemere $267 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ (tab. 4). Variačný graf má relatívne pravidelný „sinusoidálny“ priebeh s maximami OAR na konci zimy (február – apríl) a minimami v letných a jesenných mesiacoch (júl – október). Výdatnosť prameňa je nízka, ale dlhodoboz pomerne stabilná a pohybuje sa v rozmedzí $0,02$ až $0,03 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Minerálny **Prameň sv. Ondreja** pri Spišskom Podhradí je situovaný v areáli Sivej Brady pri štátnej ceste č. 18 (E 50) Poprad – Prešov. Zachytený a stavebne upravený prameň, vyvierajúci z travertínovej kopy v oblasti budovanej hlinito-kamenitými deluviálnymi sedimentmi, sa monitoruje 12x ročne v mesačných intervaloch.

Jeho vody majú hlbší obeh, a preto okrem radónu majú aj zvýšené obsahy ^{226}Ra . Predpokladáme, že zdrojová



Obr. 13. Monitoring OAR v podzemných vodách, obdobie 2002 až 2011, Prameň sv. Ondreja (Spišské Podhradie).

Fig. 13. Radon volume activity monitoring in groundwater, 2002–2011, spring Prameň sv. Ondreja (Spišské Podhradie).

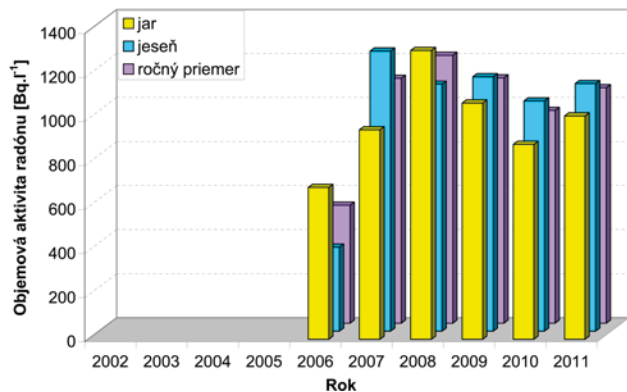
oblasť rádioaktivity týchto vôd je v podloží triasových karbonátov. Podobne ako obsah ^{222}Rn , ani koncentrácia ^{226}Ra vo vodách nebola stabilná a pri monitoringu v sezónach 1998 – 2001 varírovala v rozmedzí cca 0,2 až $1,8 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$, bez korelácie na obsah radónu.

Objemové aktivity radónu v hodnotenom období sa pohybovali v intervale 81 až $293 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pri dlhodobom priemere $168 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ (tab. 4). Najvyššia OAR bola zaznamenaná v januári 2008 (obr. 13). Variačná krivka OAR má pomerne pravidelný „vlnový“ priebeh, ktorý sa opakuje v celom monitorovanom období. Každoročne v zime a začiatkom jari (január – apríl) dosahovali merané hodnoty objemovej aktivity ^{222}Rn maximum, čo bol niekedy až cca trojnásobok jeho minimálnych obsahov, nameraných v lete až jeseni (jún – september). Výdatnosť prameňa je relatívne nízka a v období sezón 2002 až 2011 varírovala v rozmedzí $0,01$ – $0,06 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Pramenisko Jašterčie, situované cca $1,8 \text{ km}$ južne od obce Oravice, je monitorované dvakrát za rok (jar a jeseň). Prameň sa nachádza cca 30 m od vrtu OZ-1, ktorý (zrejme v dôsledku korózie a tlaku) v roku 1999 vyrazil uzáver na úvodnej pažnici vrtu s následným silným výronom vody priamo do sledovaného prameniska. Monitoring bol aj z tohto dôvodu až do roku 2006 prerušený.

Vody predmetného zdroja majú hlboký obeh viazaný na predterciérne útvary a zóny hlbinných tektonických dislokácií. Zdroj ^{222}Rn v podzemnej vode je nielen emanačný (získavaný z prostredia emanujúcich hornín), ale aj autogénny (vznikajúci rozpadom rádia obsiahnutého vo vode). Obsah rádia bol monitorovaný do roku 2000, keď sa úroveň objemovej aktivity ^{226}Ra pohybovala v intervale cca $0,5$ – $1,7 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ (Smolárová a Gluch, 2010).

V tomto prírodnom termálnom vývere podzemných vôd (teplota vody pri jarnom aj jesennom monitoringu je v rozmedzí 18 – 19°C) sú dosahované najvyššie známe OAR v prírodných podzemných vodách v rámci územia Slovenska. Potvrdzujú to aj výsledky meraní, pri ktorých sme zaznamenali OAR v rozmedzí 382 – $1\,312 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$, pri dlhodobom priemere $1\,003 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ (doposiaľ najvyššia koncentrácia ^{222}Rn vo vode, $1\,407 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$, tu bola zaznamenaná pri jesennom monitoringu roku 1998).



Obr. 14. Monitoring OAR v podzemných vodách, obdobie 2006 až 2011, pramenisko Jašterčie (Oravice).

Fig. 14. Radon volume activity monitoring in groundwater, 2006–2011, spring area Jašterčie (Oravice).

Vzhľadom na charakter objektu – pramenisko so starým poničeným zberným objektom – nie je možné (bez pomerne náročných technických prác) určiť jeho výdatnosť.

Záver

Výsledky monitorovania variácií OAR v pôdnom vzduchu dlhodobo potvrdzujú skutočnosť, že koncentrácia radónu významne závisí od meteorologických a klimatických faktorov, a teda od plynopriepustnosti miestnych zemín a hornín, ale v nezanedbateľnom rozsahu aj od samotnej štruktúrno-geologickej stavby a litologickej charakteristiky horninového prostredia v oblasti konkrétnej lokality.

Klimatické a meteorologické podmienky boli počas uplynulých 10 monitorovacích sezón pre akumuláciu a možnosti šírenia radónu v horninovom prostredí značne odlišné. V rokoch 2004 – 2006 boli dlhšie zimy a častejšie a výdatnejšie zrážky na jar pozitívne ovplyvňovali vlhkosť pôdy, a teda aj podmienky na akumuláciu radónu v horninách. O niečo iná situácia nastala v sezónach 2007 až 2009, keď zima a jar boli zrážkovo podpriemerné a menej dažďov bolo aj v letnom období (prevažne iba lokálne zrážky a búrky). Veľmi vysoké priemery atmosférických zrážok boli zaznamenané v roku 2010, keď napršalo až $1\,255 \text{ mm}$ (najviac od roku 1937, keď dosiahli $1\,015 \text{ mm}$). V sezóne 2011 došlo, naopak, k výraznému poklesu výdatnosti zrážok, ktoré dosiahli iba 656 mm (doposiaľ najnižšie zrážky v priebehu monitorovania OAR v pôdnom vzduchu na RP boli zaznamenané v roku 2003 = 573 mm). Záver roka 2011 bol jedným z najsuchších období za posledných viac ako 100 rokov (tab. 4).

Všeobecne sa predpokladá, že vlhkosť pokryvných útvarov „pozitívnym“ spôsobom ovplyvňuje koncentráciu radónu v pôdnom vzduchu, pretože vyššia vlhkosť horninového prostredia viac alebo menej účinne spomaľuje prenikanie radónu k povrchu a ďalej do ovzdušia. To vedie k nárastu jeho obsahu v pôdnom vzduchu a naopak – pri poklese pôdnej vlhkosti klesajú aj hodnoty OAR. Táto závislosť sa v rôznom rozsahu prejavila vo väčšine monitorovaných lokalít. Nejednoznačnou sa predbežne javí súvislosť medzi zvýšením úrovne OAR v pôdnom vzduchu v sezónach s vysokými zrážkovými priermi, ktorá si bude vyžadovať dlhodobejšie sledovanie.

Sezónne variácie OAR v pôdnom vzduchu závisia nielen od vlhkosti a plynopriepustnosti miestnych zemín a hornín, ale aj od samotnej geologickej stavby a litologickej charakteristiky konkrétnej lokality. Z toho vyplýva, že aj pri rovnakých meteorologických podmienkach, ale v rôznom geologickom prostredí nemusí byť charakter variácií zhodný. Tento poznatok je jedným z významných zistení pri sledovaní variácií OAR v pôdnom vzduchu v rámci predmetnej úlohy.

Príkladom toho sú výsledky monitoringu OAR v pôdnom vzduchu na RP Novoveská Huta (homogénne permské sedimenty strednej plynopriepustnosti) a RP Teplička (paleogénne sedimenty so strednou až nízkou plynopriepustnosťou, so zvýšeným podielom ílovitej frakcie), ktoré sú relatívne blízko seba (cca 5 km), prakticky v rovnakej klimatickej oblasti, ale s odlišným

geologickým profilom, v ktorom je akumulácia a šírenie radónu sledované.

Obidve tieto lokality boli monitorované zväčša v ten istý deň (t.j. v porovnateľných meteorologických podmienkach), ale výsledky meraní OAR v pôdnom vzduchu vykazujú odlišný priebeh – v letných mesiacoch je na RP Novoveská Huta zaznamenaný zvýšený a na RP Teplička znížený obsah radónu v pôde a na jar a jeseň naopak (Novoveská Huta nízky a Teplička vysoký OAR).

Medzi významné výsledky monitorovania obsahu radónu v pôdnom vzduchu treba zaradiť aj pozorovaný jav prudkého poklesu OAR, ktorý sa na RP Novoveská Huta prejavuje pri prvých mrazoch na jeseň, prípadne aj pri prízemných mrazoch na jar. Zrejme v dôsledku teplotného gradientu medzi pôdnym a atmosférickým vzduchom radón intenzívnejšie uniká do atmosféry a jeho obsah v pokryvných sedimentoch klesá.

Výsledky monitorovania OAR v pôdnom vzduchu dlhodobo dokumentujú variabilitu jeho obsahu v pri-povrchových častiach horninového prostredia v priebehu roka, ale aj v období viacerých monitorovaných sezón. Potvrďuje sa pomerne významná závislosť úrovni OAR v meteorologických, resp. klimatických podmienkach, ale s nejednoznačným efektom v jednotlivých lokalitách, čo je zrejme dôsledkom ich odlišných štruktúrno-geologických a litologických charakteristík.

Variácie objemovej aktivity radónu v sledovaných zdrojoch podzemných vôd majú skôr sezónny charakter a v priebehu monitorovania počas viacerých sezón vykazujú určitú vlnovú, resp. „sinusoidálnu“ pravidelnosť. Na rozdiel od pôdneho radónu nie sú natoľko ovplyvňované náhodnými javmi, resp. zmenami v atmosfére, a nie sú také „citlivé“ na rôzne krátkodobé zmeny počasia (teplota, atmosférický tlak). Maximálne úrovne OAR v podzemných vodách sú zaznamenané spravidla v zime, resp. na jar, a minimálne hodnoty v letných a jesenných mesiacoch. Ani v jednom z monitorovaných objektov nebola preukázaná vzájomná korelácia medzi objemovými aktivitami ^{222}Rn a ^{226}Ra , ako ani súvislosť medzi výdatnosťou zdroja a koncentráciou radónu v odobratých vzorkách podzemných vôd.

Monitorovanie koncentrácie pôdneho radónu nad tektonickou dislokáciou dokumentuje veľmi dobrú vzájomnú koreláciu výsledkov meraní. Absolútne hodnoty OAR v pôdnom vzduchu v priebehu viacerých sezón síce vykazujú určité rozdiely, ale priebeh a charakter kriviek zostáva zachovaný. Z praktického hľadiska to môže mať význam napr. pri sledovaní „aktívnych“ tektonických dislokácií, kde je vysoká pravdepodobnosť ich pozitívnej identifikácie aj za menej priaznivých podmienok.

Doposiaľ získané poznatky majú dalekosiahly význam, pretože poukazujú napr. na možnosť významného podhodnotenia radónového rizika stavebného pozemku pri meraniach realizovaných za nevhodných meteorologických podmienok (dlhodobé suchá, obdobia s vysokými zrážkami, výrazné teplotné rozdiely medzi atmosférou a pokryvnými sedimentmi hlavne skoro na jar, neskoro na jeseň, prípadne v zime). Nevyhnutné je aj dôkladné posúdenie geologického prostredia (hlavne vo zvrstvených

sedimentoch so zvýšeným podielom ílovitej frakcie, prítomnosť tektonických dislokácií a pod.) pri vyhodnocovaní výsledkov týchto meraní.

Zhodnotenie výsledkov monitorovania OAR v geologickom prostredí dokumentuje skutočnosť, že zmeny (variácie) jeho koncentrácie sú jednak pravidelné (sezónne), ale aj náhodné (miestne, časové, ...). Postupne získavané a zhromažďované poznatky o variabilite obsahu radónu v horninovom prostredí a podzemných vodách, ich vyhodnotenie, spracovanie a sprístupnenie výsledkov monitoringu prostredníctvom služieb internetu sú jednoznačne prínosom pre možnosť objektívnejšieho hodnotenia radónového rizika v geologickom prostredí.

Podakovanie. Autori sú zaviazaní H. Smolárovej za množstvo relevantných výsledkov a údajov získaných za viac ako desaťrocie vedenia podsystemu projektu ČMS GF, a L. Kucharičovi za cenné pripomienky pri recenzii tohto príspevku.

References

- ČÍZEK, P., 1976: Správa o výsledkoch geologickoprieskumných prác urobených v roku 1976. *Manuskript. Archív Uranpres, s. r. o., Spišská Nová Ves.*
- ČÍZEK, P., et al., 1986: Pozemné overovanie leteckých anomálií spektrometrie gama, čiastková správa úlohy č. 06821672, *Manuskript. Archív Geofond, Bratislava.*
- ČÍZEK, P., SMOLÁROVÁ, H. & GLUCH, A., 2001: Prírodná rádioaktivita. Čiastková záverečná správa. In: Kubeš, P., et al. (ed.): *Atlas geofyzikálnych máp a profilov. Manuskript. Archív Geofond, Bratislava.*
- GLUCH, A., DZURENDA, Š. & PRAMUKA, S., 2011: Mapy prognózy radónového rizika v mierkach 1 : 200 000 a 1 : 500 000. Geologický informačný systém. *ŠGÚDŠ, Bratislava.*
- LUČIVJANSKÝ, L., 1993: Súbor máp geofaktorov životného prostredia – rádiohydrochemické vzorkovanie. Čiastková záverečná správa. *Manuskript. Archív Geofond, Bratislava.*
- NIKODEMOVÁ, D., PINTER, I. & VIČANOVÁ, M., 2003: Radón a jeho potenciálne riziko v Spišsko-gemerskom regióne. In: *Životné prostredie č. 3. Manuskript. Archív ŠGÚDŠ, Bratislava.*
- Príloha č. 7 k Nariadeniu vlády SR 350/2006. *ŠGÚDŠ, Bratislava.*
- Smernica MŽP SR č. 1/2000-3 na zostavovanie a vydávanie máp prírodnej a umelej rádioaktivity v mierke 1 : 50 000. *ŠGÚDŠ, Bratislava.*
- SMOLÁROVÁ, H., 1998: Monitoring objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí na území Slovenskej republiky. Projekt. *ŠGÚDŠ, Bratislava.*
- SMOLÁROVÁ, H. & GLUCH, A., 2010: Monitoring objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí na území Slovenskej republiky. Záverečná správa za obdobie 2002 – 2009. *ŠGÚDŠ, Bratislava.*
- Vyhláška MZ SR 528/2007, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o požiadavkách na obmedzenie ožiarovania z prírodného žiarenia. *ŠGÚDŠ, Bratislava.*
- webová stránka: Státní ústav radiační ochrany, v. v. i., www.suro.cz
- webová stránka: Slovenský hydrometeorologický ústav, www.shmu.sk
- webová stránka: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, www.geology.sk
- Zákon NR SR 355/2007 o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a o zmene a doplnení niektorých zákonov. *ŠGÚDŠ, Bratislava.*

Rukopis doručený 2. 1. 2013
Revidovaná verzia doručená 3. 1. 2013
Rukopis akceptovaný red. radou 27. 2. 2013