

Časové zmeny radónu vo vybraných prameňoch Považského Inovca

Terézia Eckertová¹
Školiteľ: Monika Müllerová²

Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Koncentrácia radónu vo vodách nie je konštantná a z dlhšieho časového hľadiska môže dochádzať k veľkým výkyvom. Od marca 2015 do januára 2016 bolo pohorie Považského Inovca mapované a skúmané na rádioaktivitu podpovrchových vôd. Lokalizovalo sa 41 prameňov z ktorých 5, ktoré vykazovali pri ich prvotnej analýze najvyššie hodnoty objemovej aktivity radónu (OAR), boli ďalej sledované v dlhšom časovom rozpätí. V tejto práci sú zhrnuté dosiahnuté výsledky týchto prieskumov z obdobia od 20.9. 2015 do 21.3. 2016. Monitorovanie zmien OAR prebiehalo spravidla každý týždeň, kedy sa zaznamenávali variácie OAR v závislosti od meteorologických podmienok a ďalej veličiny nimi ovplyvnené ako teplota a prietok prameňa. Keďže koncentrácia radónu vo vodách je podmienená najmä množstvom materského nuklidu, ktorý obsahujú okolité horniny ktorými voda preteká, polohy jednotlivých prameňov sú priradené nie len k mapám prírodnej rádioaktivity ale aj ku geologickým mapám podložia [GUDS] a následne spracované programom Surfer 11[Surfer 11, 2013]. Pre lepšie znázornenie a pochopenie týchto zmien sú OAR konkrétnych prameňov vynesené do grafov spolu s pozorovanými veličinami.

Kľúčové slová: radón, objemová aktivita, prietok, podložie, teplota, variácie

1 Úvod

Pod názvom radón sa rozumie jeden z izotopov rovnomenného prvku, ktorý má nukleónové číslo 222 a dobu polpremeny 3,826 dňa. Vzniká premenou alfa ^{226}Ra , ktorý sa v rôznych pomeroch nachádza vo všetkých typoch hornín, teda najmä v podloží s uránovým základom [Wilkening, 1990].

Keďže ide o inertný plyn, relatívne ľahko dokáže putovať pôdou cez jej póry a pukliny a bez ďalšieho zreagovania sa dostať až k voľnej atmosfére kde je následne rozptýlený. Počas tohto transferu dochádza aj k obohacovaniu podzemných vôd o radón, keďže jeho rozpustnosť pri bežných teplotách okolo 300 K je približne 0,25, pričom jeho rozpustnosť s klesajúcou teplotou prudko rastie až na hodnotu 0,5 pri teplote 275K. [Serdjukova & Kapitanov, 1969].

Podľa inštitúcie UNSCEAR radón spôsobuje až 55 % z celkovej radiačnej záťaže obyvateľstva, preto sa jeho koncentrácie v rôznych médiách monitorujú [UNSCEAR, 1993]. Aj keď sa expozícia radónom spája najmä s jeho inhaláciou a následným ožarovaním pľúcnych epitelov produktmi jeho premeny, ktoré tvoria prevažne ťažké kovy ako ^{214}Po , ^{214}Pb , ^{210}Pb , radiačné riziko radónu a jeho dcérskych produktov spojené s ďalšími spôsobmi preniku do organizmu nie je zanedbateľné. V pitných vodách dodávaných spotrebiteľom sú jeho koncentrácie kontrolované a regulované. V prírodných vodách, kde množstvo radónu v nich obsiahnutých závisí od aktuálneho stavu podzemných vôd, teploty, zrážok, prietoku a pod. je možné sledovať variácie radónu.

Okrem iného má radón vďaka svojim špecifickým vlastnostiam mnoho aplikačných využití v rôznych odvetviach. Sledovanie zmien jeho koncentrácií v prírodných vodách sa využíva napríklad aj v seizmológií ako jeden z indikátorov blížiaceho sa zemetrasenia alebo v hydrogeológii taktiež slúžia na určenie doby infiltrácie povrchových vôd do podzemných [Wilkening, 1990].

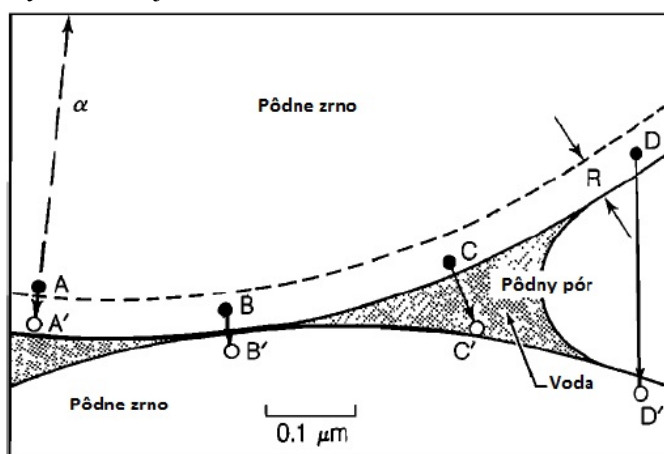
¹ terka6@gmail.com

² Monika.Mullerova@fmph.uniba.sk

2 Radón v pôde

Obohatenie zemskej kôry o primordiálne rádionuklidy nastalo už pri prvotnej syntéze prvkov pred 4,5 mld. rokmi. Jedným z takých prvkov je aj ^{238}U z ktorého po 4 medziproduktov vzniká ^{226}Ra . Jeho alfa premenou zas vzniká ^{222}Rn , ktorého prísun do pôdy je vďaka dobe polpremeny 1600 rokov jeho materského nuklidu neustále zabezpečený. Pri tejto premene je atómu ^{222}Rn odovzdaná energia len 0,1 MeV, zvyšok energie, teda 4,78 MeV si odnáša vzniknutá alfa častica. Podľa zákona zachovania hybnosti sa atóm odrazí opačným smerom ako alfa častica, pričom jeho dolet v závislosti od okolitých podmienok je okolo 20 -70 nm [Nazaroff, 1992].

V prípade, ak je okraj pôdneho zrna od miesta vzniku radónu ďalej ako jeho dolet, takýto atóm z neho neunikne. Ak však radón vzniká pri povrchu zrna alebo je rozmer zrna menší ako dolet atómu, pri takýchto podmienkach môže atóm zo štruktúry preniknúť a dostať sa do pôdnych pórov a puklín. Možné situácie schematicky znázorňuje obr. 1.



Obr. 1: Možné trajektórie vzniknutých atómov ^{222}Rn v pôdnych zrnách [Nazaroff, 1992].

Takýto proces uvoľnenia z kryštalickej mriežky minerálu sa nazýva emanácia a pomer vyjadrujúci počet atómov ktoré sa uvoľnia z pôdneho zrna k celkovému počtu atómov ktoré v materiáli vzniknú sa nazýva emančný koeficient [Nazaroff, Moed, Sextro, 1988].

Emančný koeficient sa mení v závislosti od viacerých faktorov. Vplyvajú naň samotné geometrické, chemické a fyzikálne vlastnosti pôdnych zrn ako ich veľkosť a tvar, minerálne zloženie či hustota kryštalickej mriežky [Nazaroff, Moed, Sextro, 1988; Markkanen, Arvela, 1992]. Mení sa aj od vlhkosti, tlaku a teploty okolitého prostredia. Platí, že čím je vyššia teplota a nižšia vlhkosť, tým viac narastá emančný koeficient. Prítomnosť vlhkosti v podobe vrstvy vody okolo pôdneho zrna spôsobí, že sa zvýši pravdepodobnosť zachytenia atómu vo vode v mieste pôdneho póru, ktorý by inak prešiel do ďalšieho pôdneho zrna [UNSCEAR, 2000].

2.1 Exhalácia radónu

Časť atómov radónu, ktoré sa dostanú do puklín a pórov v pôde sa naďalej môžu šíriť procesmi difúzie a konvekcie. Rýchlosť, ktorou sa môžu šíriť závisí od geologických a meteorologických parametrov, avšak vzdialenosť tohto transportu je ohraničená samotnou dobou polpremeny ^{222}Rn [Daniel a kol., 1996]

Tepelný pohyb molekúl zabezpečuje difúzny transport radónu, ktorý sa presúva z miest s vyššou koncentráciou plynu na nižšiu, teda proti smeru zvyšujúceho sa gradientu koncentrácie. Fyzikálne je tento proces opísaný Fickovým zákonom [Wilkening, 1990].

Tento pohyb ovplyvňujú vlastnosti okolitého prostredia, najmä vlhkosť a pórovitosť materiálu. Čím je väčšia pórovitosť štruktúry, tým vyšší je difúzny koeficient a naopak klesá, čím vyššia je vlhkosť okolia [Gudzenko, Dubincuk, 1987; Nazaroff, Moed, Sextro, 1988; Serdjukova & Kapitanov, 1969]. Preto sa radón týmto spôsobom môže šíriť až do vzdialenosti 1,5 m v suchých pieskovitých pôdach a do vzdialenosti približne 0,5 metra v jemnozrnných vlhkých pôdach. Naopak vo veľmi hustých materiáloch ako je žula je táto vzdialenosť rádovo 0,1 - 0,15 m [Ishimori, Lange, Martin, Mayya, Phaneuf, 2013].

Pohyb vôd a zmena fyzikálnych podmienok horninového prostredia, t.j. gradienty teploty, tlaku a napätia v horninovom masíve spôsobujú konvekčné prúdenie. Prejavuje sa najmä v tektonicky porušených zónach a v častiach s vysokými hodnotami difúzneho koeficientu. Umožňuje transport atómov ^{222}Rn do veľkých vzdialeností až 150 - 200 m a vplýva naň ako vlhkosť prostredia tak aj permeabilita pôdy [Böhm, 2007].

2.2 Delenie pôd podľa obsahu uránu

Množstvo radónu v podloží je ovplyvnené predovšetkým množstvom jeho materského nuklidu rádia v pôde. ^{226}Ra ako aj ^{238}U samotné minerály netvoria, avšak v určitých koncentráciách sú obsiahnuté vo väčšine typoch hornín. Priemerné hodnoty hmotnostných aktivít ^{226}Ra v nerastoch sú 40 Bq.kg^{-1} , pričom typické hodnoty kolíšu v rozmedzí 1 - 1000 Bq.kg^{-1} , v uránových rudách sa dosahujú niekoľkonásobne vyššie hodnoty [Holý, 2009; Wilkening, 1990].

Vo všeobecnosti najvyššie koncentrácie rádia a s ním spojeného radónu dosahujú kyslé vyvreté horniny ako napríklad granit a ryolit. Nižšími hodnotami sú charakteristické metamorfované horniny a najnižšie hodnoty dosahujú mladé sedimenty napríklad vápence a pieskovce [Holý, 2009].

2.2.1 Podložie Považského Inovca

Výskyt radónu na danom území úzko súvisí s jeho geologickou štruktúrou. Pohoria na Slovensku sa zaraďujú medzi útvary Západných Karpát, pričom podstatnú časť územia, t.j. 12% tvoria práve jadrové pohoria medzi ktoré patrí aj Považský Inovec. Jadrové pohoria sa z hľadiska prírodnej rádioaktivity zaraďujú do kategórie stredného radónového rizika [Daniel a kol., 1996].

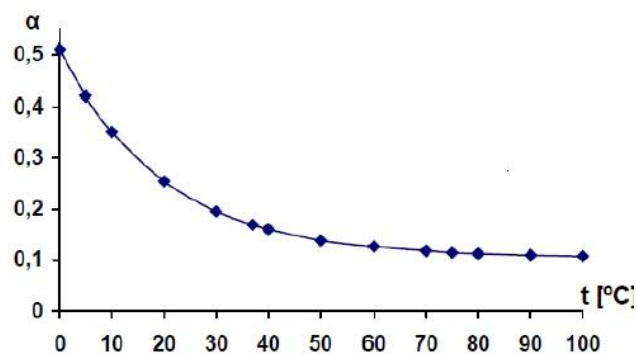
Pohorie Považského Inovca sa delí na 3 bloky: selecký (severný), bojníansky (stredný) a hlohovský (južný). Každá časť má svoje špecifiká, avšak podstatnú časť tvorí kryštalické jadro. Komplex kryštalinika tvoria horniny vysokého stupňa metamorfózy, v severnej časti najmä svory, pararuly, granity či miestami aj amfibolity. Stredný blok má typické znaky jadrového pohoria, ktoré budujú tri mezozoické jednoty - obalová, krížňanská a chočská. Tvoria ich najmä vápence, pieskovce ale i granity, granoidy a dolomity. V južnom segmente veľkú časť územia tvoria prevažne rôzne druhy pararúl a svorové ruly [Mahel', 1986].

3 Radón vo vodách

Napriek tomu, že horninové prostredie umožňuje len obmedzený pohyb podzemnej vody cez systém úzkych puklín, poloha jej hladiny sa neustále mení. Okrem období veľkých úhrnov zrážok jej úroveň klesá ako podzemná voda steká smerom do údolia [LeGrand, 1987].

Ak sa takáto voda dostane do kontaktu s podložíom obsahujúcim rádium, dochádza k procesu emanácie radónu do podzemnej vody v ktorej je čiastočne rozpustný. Pôvod takéhoto radónu vo vodách voláme alogénny (emanačný). Preto čím vyšší obsah radónu vo vodách, tým vyššie hodnoty rádia obsiahnutého v okolitom prostredí sa môžu očakávať. Ak sa rádium priamo nachádza vo vode, takto vzniknutému radónu sa priraduje autigénny pôvod [Lučivjanský, 1997].

Rozpustnosť radónu charakterizuje koeficient rozpustnosti α dávajúci do pomeru koncentráciu radónu v kvapaline k jeho koncentrácií vo vzduchu. Ide o funkciu závislú od teploty a v prípade sladkej vody ju znázorňuje graf č. 2 [Serdjukova & Kapitanov, 1969].



Obr. 2: Graf závislosti koeficientu α od teploty t [Serdjukova & Kapitanov, 1969]

Na veľkosť koeficientu rozpustnosti vplyva aj mineralizácia vôd. Čím je vyšší stupeň mineralizácie, tým nižší je koeficient rozpustnosti [[Serdjukova & Kapitanov, 1969](#)].

3.1 Vplyvy na množstvo radónu vo vodách

Koncentrácie radónu vo vodách kolíšu v širokých intervaloch. Hodnoty objemových aktivít sa líšia pre vody stojaté či tečúce, povrchové či podzemné, rozdielne hodnoty boli zaznamenané aj pre vody s rôznym chemickým zložením, t.j. rôznym stupňom mineralizácie. Okrem iného na objemovú aktivitu radónu (OAR) vôd vplyvajú aj tektonické pomery, ich teplota či výskyt minerálov z uránovým základom. Z tohto hľadiska najvyššie hodnoty objemových aktivít dosahujú termálne a minerálne vody pochádzajúcich z karbonátových hornín. Podľa Langeho klasifikácie, zvýšenú až vysokú OAR majú radónové vody kôry zvetrávania magmatických hornín. Charakteristicky sú slabo mineralizované a studené vznikajúce v porušených oblastiach kyslého kryštalického podložja. Ide predovšetkým o jadrové pohoria [[Daniel a kol., 1996](#)].

Vo všeobecnosti obsah radónu v podzemných vodách závisí najmä od hydrodynamických faktorov t.j. rýchlosť cirkulácie vody, od rovnovážnej koncentrácie radónu ktorá je nepriamo úmerná plošnému obsahu prierezu fraktúry naplnenej vodou a obsahu rádia vo zvodnenej vrstve pôdy a vo vode [[Frengstad et al., 2003](#)].

3.2 Koncentrácie ^{222}Rn vo vodách

Najnižšie hodnoty objemových aktivít ^{222}Rn dosahujú povrchové vody a to najmä moria a oceány, ktorých hodnoty OAR sú na úrovni $0,6 \cdot 10^{-3}$ - $34 \cdot 10^{-3}$ Bq.l⁻¹. Rieky a jazerá sa pohybujú v rozmedzí niekoľko stotín Bq.l⁻¹ až po 30 Bq.l⁻¹. V prípade podpovrchových vôd rozhoduje typ hornín ktorými voda preteká, ale aj intenzita výmeny vody. Z tohto pohľadu vody sedimentárnych hornín pri veľmi ťažkej výmene disponujú najnižšími hodnotami od 0,07 po 20 Bq.l⁻¹ a vody kyslých magmatických hornín, kde prebieha intenzívna výmena vody, zvýšené hodnoty približne od 17 až po 200 Bq.l⁻¹. Vôbec najvyššie hodnoty OAR radónu sú v prípade vôd uránových ložísk, kedy tieto hodnoty kolíšu v intervale niekoľko desiatok až tisícoch Bq.l⁻¹ [[Smetanová, 2009](#)].

Na území Slovenska, pri zostavovaní máp prírodnej rádioaktivity vôd bolo odobratých 5299 obyčajných podzemných vôd, 243 minerálnych a termálnych vôd. Pri ich analýze najnižšie hodnoty sa pohybovali od 0,01 Bq.l⁻¹, pričom najvyššia nameraná hodnota bola 1288,4 Bq.l⁻¹. [[Lučivjanský, 1997](#)]. Podľa vyhlášky Ministerstva zdravotníctva SR sú smerné hodnoty na vykonanie opatrení na zníženie obsahu prírodných rádionuklidov v prírodných minerálnych vodách 100 Bq.l⁻¹ pri prekročení celkovej aktivity alfa a beta, pričom najvyššie prípustné hodnoty na prípravu stravy u týchto typov vôd je 600 Bq.l⁻¹ [[Zákon č. 528/2007](#)]. Celkovo sa však vody s OAR ^{222}Rn nad 200 Bq.l⁻¹ považujú sa rádioaktívne. Po túto hranicu rozlišujeme vody s nízkou OAR (pod 20 Bq.l⁻¹), s mierne zvýšenou (pod 50 Bq.l⁻¹) a so zvýšenou OAR [[Daniel a kol., 1996](#)].

4 Aplikačné využitie

Napriek mnohým vlastnostiam, pre ktoré sa ^{222}Rn javí ako len rádioaktívny alfa žiarič negatívne vplyvajúci na zdravie človeka je prospešný pri viacerých činnostiach človeka a nachádza uplatnenie v rôznych odvetviach.

Kontinuálne monitorovanie a sledovanie anomálií OAR ^{222}Rn v podzemných vodách sa v niektorých krajinách využíva na predpovedanie zemetrasení. Vo vrtoch vybudovaných za týmto účelom bol pozorovaný prudký nárast koncentrácií pár dní pred zemetrasením a tesne pred samotným otrasom prudký pokles v dôsledku upchatia mikrotrhlín v podloží [[Igarashi, Saeki, Takahata, Sumikawa, Tasaka, Sasaki, Takahashi, Sano, 1995](#)].

Vďaka stimulujúcim účinkom alfa žiarenia na organizmus sa sledovanie koncentrácií radónu vo vodách môže využiť aj pri hľadaní liečivých prameňov. Difúziou sa mäkké žiarenie dostáva do organizmu a pri absorbovaní takejto energie sa aktivujú všetky zložky imunitného systému. To následne vedie k zlepšeniu pohybového i dýchacieho aparátu a priaznivo vplyva na nervové a cievne systémy. Objemové aktivity radónu v takýchto vodách sa pohybujú aj niekoľko kBq.l⁻¹ [[Iaznejachymov](#)].

Využitie doby polpremeny radónu sa dá využiť aj ako dobrý stopovač. Slúži na určenie veku a pôvodu mladých podzemných vôd, odhad zotrvania vody v rezervoároch či na určenie interakcie medzi povrchovými a podzemnými vodami alebo infiltrácie vody do studní [Holý, 2002]. Sledovanie koncentrácií radónu možno využiť aj pri hľadaní nálezísk uránu a v neposlednom rade pri dodržiavaní rádiohygienických limitov [Zákon č. 528/2007].

5 Metodika práce

Prvé predbežné odbery vzoriek prameňov v lokalite Považský Inovec boli analyzované od marca 2015. Ku sledovaniu zmien koncentrácií ^{222}Rn , teda k pravidelným odberom vôd sa pristúpilo 20.9.2015 pričom posledný rozbor zahrnutý v tejto práci je z 21.3.2016. Do 0,33 l plastových fliaš sa odoberali vody z piatich prameňov, ktoré vykazovali mierne zvýšenú až zvýšenú objemovú aktivitu radónu v čase ich prvej analýzy. Popri odberov sa zaznamenávala aj teplota jednotlivých prameňov a u tých tečúcich aj ich výdatnosť.

Samotné merania prebiehali v laboratóriách KJFB FMFI UK pričom objemová aktivita radónu v čase odberu vzoriek sa vypočíta pomocou vzťahu [Müllerová, 2008]:

$$A(t) = \frac{n_{vz} - n_p}{\varepsilon_p \varepsilon_d V} e^{\lambda t_{om}} \frac{\lambda t_m}{1 - e^{-\lambda t_m}} \quad (1)$$

kde n_{vz} je početnosť od vzorky (s^{-1}), n_p početnosť od pozadia (s^{-1}), λ konštanta premeny radónu (s^{-1}), t_{om} doba od konca odberu po začiatok merania (s), t_m doba merania vzorky (s), ε_p účinnosť prevodu, ε_d detekčná účinnosť a V objem vzorky (l).

Na meranie sa používali scintilačné komôrky Lucasovho typu s objemom 125 ml. Zo 7 ml vzorkovej vody sa do nich previedol vzduch obsahujúci radón. Po dosiahnutí rádioaktívnej rovnováhy medzi radónom a jeho produktmi premeny, t.j. po cca 3 hodinách sa spustilo meranie a v 2000 s intervaloch sa registrovali impulzy od vzorky.

Na základe poskytnutých údajov zo Slovenského hydrometeorologického ústavu obsahujúcich úhrny zrážok a priemerné denné teploty zaznamenané na meteorologickej stanici Piešťany sa zostrojili grafy obsahujúce tieto dáta spolu nami odmeranými veličinami.

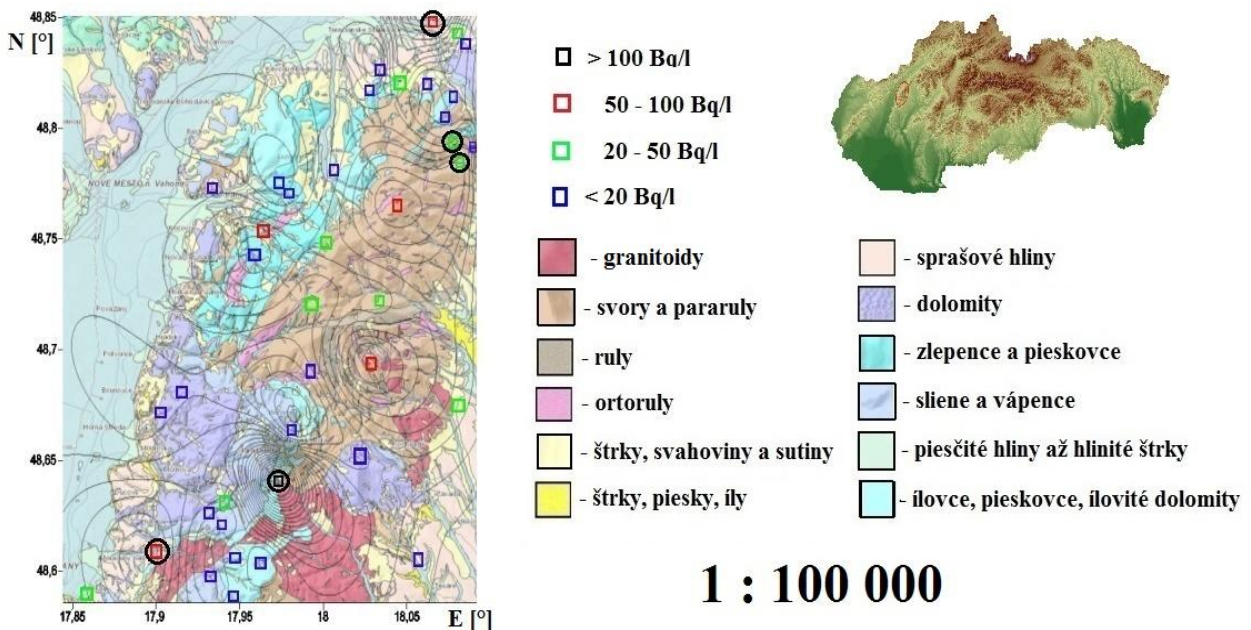
Geografické polohy jednotlivých prameňov boli priradené k mapám prírodnej rádioaktivity na základe radónového rizika a ku geologickým mapám podložia [GUDS] prostredníctvom programu Surfer 11 [Surfer 11, 2013]. Oblasti vyplývajúce z nameraných zemepisných súradníc boli dopočítané programovou metódou kriging. Na posledné úpravy a výsledný tvar máp bol použitý grafický software Adobe Photoshop Elements 9 [PSE 9, 2010].

6 Výsledky a diskusia

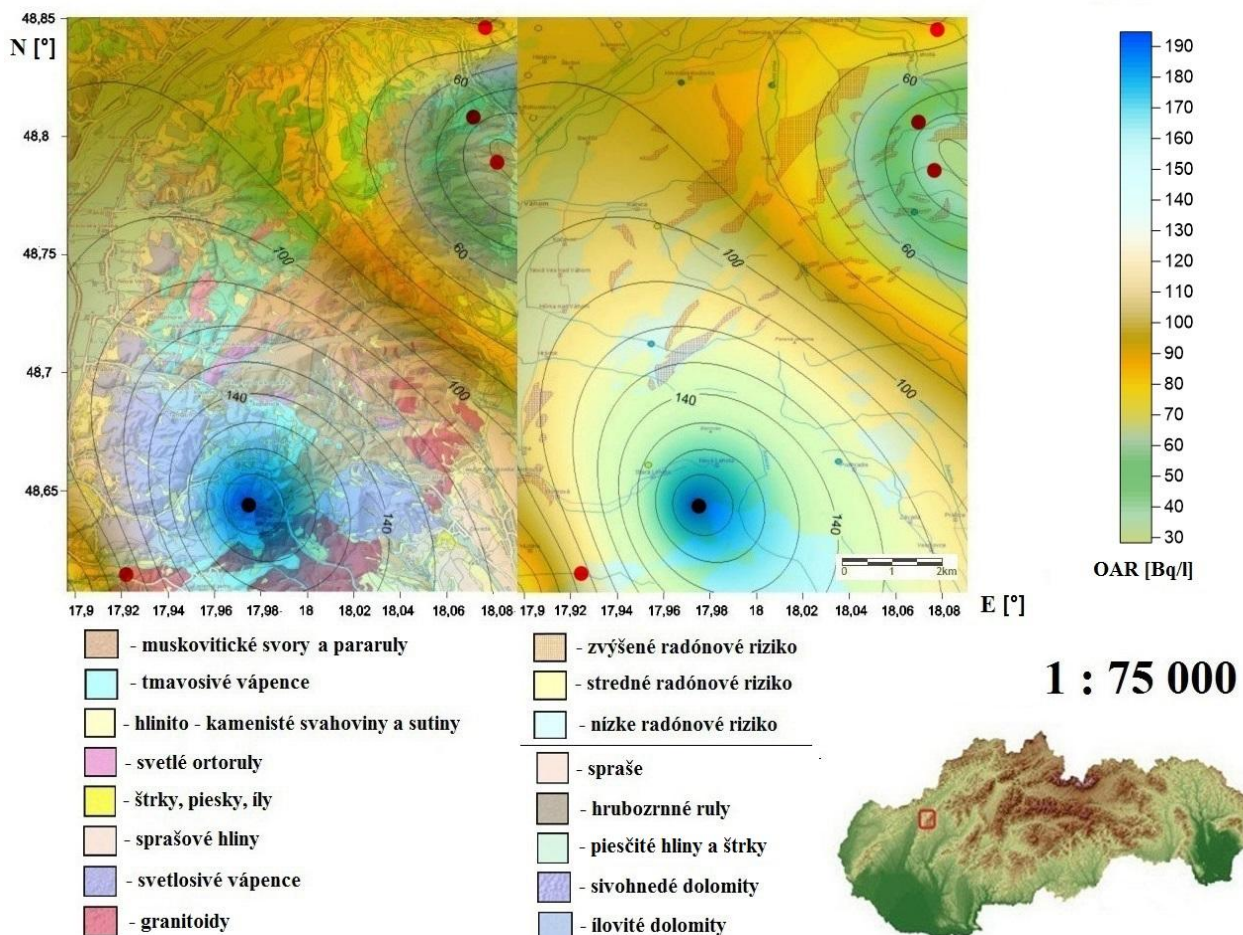
Oblasť Považského Inovca s vyznačenými 41 prameňmi z ktorých boli odobraté vzorky, je vrátane piatich vyšetrovaných, ktoré sú krúžkom vyznačené sú zakreslená na geologickej mape pohoria (obr. 3). Na mape sú vyznačené izočiary, ktoré spájajú miesta s rovnakou OAR podpovrchových vôd vytvorených na základe vstupných hodnôt predstavujúcich zemepisnú polohy prameňov spolu s ich OAR. Zakrúžkované pramene boli vybrané na dlhodobé sledovanie variácií radónu v týchto vodách. Namerali sa hodnoty OAR vo veľmi širokom intervale hodnôt od 0,94 Bq/l po 183 Bq/l. Bolo nájdených 6 prameňov so zvýšenou OAR a 8 prameňov s mierne zvýšenou OAR. Vybrali sme 5 prameňov pre dlhobojšie monitorovanie na základe ich geologického umiestnenia, z hľadiska rovnakého typu podložia, z geografickej polohy, z hľadiska ich prístupnosti t.j. využitia ako zdroja pitnej vody.

Konkrétne výsledky objemových aktivít radónu piatich vyšetrovaných prameňov Považského Inovca vrátane doplňujúcich veličín pozostávajúcich z ich teploty a výdatnosti počas celého pozorovaného obdobia sú spracované v tabuľkách 1 až 5. Mapy znázornené na obr. 4, jedna s typom podložia a druhá zahŕňajúca potenciálne radónové riziko predstavujú oblasť miesta výskytu vôd dotvorené programom ako by sa objemová aktivita radónu podľa vložených hodnôt mohla vyvíjať. Časový priebeh OAR spolu so sprievodnými meteorologickými prvkami a fyzikálnymi parametrami prameňov sú zakreslené na grafoch 5-9, pričom údajom OAR a výdatnosť prislúcha sekundárna

(pravá) os grafu. Ľavá os grafu zodpovedá ďalším veličinám ako úhrn zrážok, teplota okolia a teplota prameňa.



Obr. 3: Geologická mapa Považského Inovca spolu s vyznačenými 41 prameňmi [GUDS]



Obr. 4 : Geologická mapa a mapa radónového rizika oblasti Považského Inovca spolu s vybranými prameňmi a ich OAR [GUDS]

Z grafického znázornenia týchto prameňov možno pozorovať súvis medzi teplotou okolia a adekvátnou zmenou teploty prameňa. Takisto aj v prípadoch kedy je evidovaný ich prietok možno

vidieť koreláciu s množstvom zrážok, pričom táto závislosť je časovo posunutá približne o týždeň. To pravdepodobne predstavuje dobu, kedy povrchová voda infiltruje do podzemnej, čím ovplyvní miestny rezervoár a tým aj objem vody presakujúcej na povrch. Z hľadiska vplyvu teploty či aktuálneho prietoku prameňa však nepozorujeme vplyv na zmenu objemovej aktivity radónu, aj keď hypoteticky za rovnakých podmienok by nižšiu koncentráciu radónu mal mať tečúci prameň, keďže pri veľkom premiešavaní sú atómy ^{222}Rn schopné efektívnejšie uniknúť do okolitého prostredia. V našich meraniach, ak porovnáme pramene s podobnými hodnotami OAR, registrujeme skôr opačný prípad. Pramene so stojatou vodou majú nižšiu OAR ako tie s vodou tečúcou, čo však okrem už sledovaných vplyvov u prameňov nachádzajúcich sa na rovnakom type podložja zapríčiňuje aj ich odlišná hĺbka, z ktorej voda vyviera.

V prípade prameňov Patrovce v Zádvorí a Prameň v potôčiku sa hodnoty OAR pohybujú v rámci mierne zvýšenej objemovej aktivity. Pramene sú od seba vzdialené vzdušnou čiarou 2 km a oba sa nachádzajú v lokalite so stredným radónovým rizikom a na podloží typu svory a pararuly patriace medzi metamorfované horniny sukcesie kryštalinika (obr. 3 a obr. 4). Oba pramene patria svojím chemickým zložením medzi tzv. kyselky [[kyselky](#)], železité studené vody, slabo mineralizované a často používané aj ako zdroj pitnej vody.

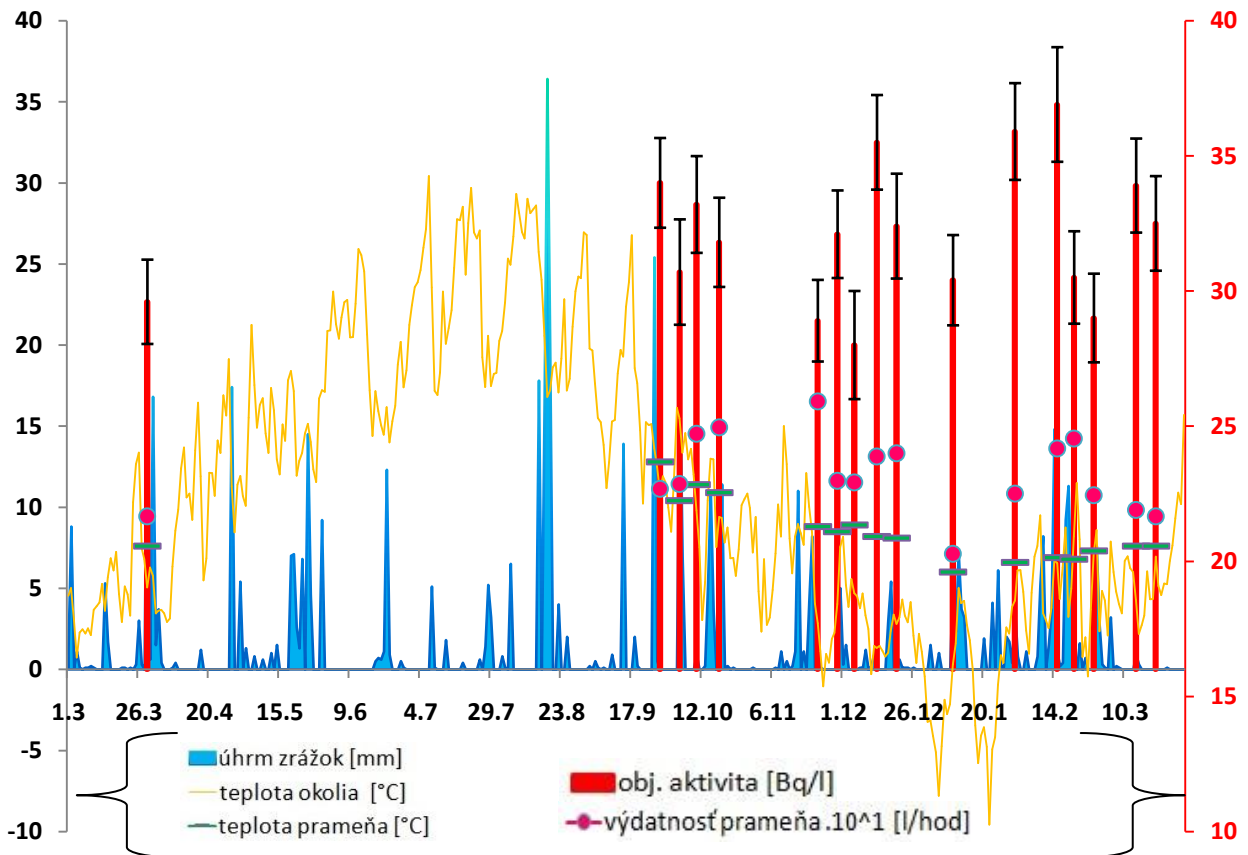
Kyselka Patrovce v Zádvorí mala najnižšiu hodnotu OAR (28 ± 2) Bq.l⁻¹ dňa 5.12.2015 a najvyššiu ($36,9 \pm 2,1$) Bq.l⁻¹ dňa 15.02.2016 (tab. 1). Pre Prameň v potôčiku bola doteraz najvyššia OAR nameraná 10.10.2015 s hodnotou ($33,1 \pm 1,6$) Bq.l⁻¹ a najnižšia 22.2.2016 s hodnotou ($22,4 \pm 1,4$) Bq.l⁻¹ (tab. 2). V oboch prípadoch, kedy sme namerali najvyššiu OAR predchádzali času odberu dni s veľkými alebo častými úhrnmi zrážok. V období, kedy sa namerala najnižšia hodnota pre Prameň v potôčiku inak registrujeme relatívne vysoké hodnoty objemovej aktivity a v prípade prameňa Patrovce v Zádvorí dokonca najvyššie za celé merané obdobie. V tomto období (obr. 5 a obr. 6), mesiace január a február, spadlo veľké množstvo zrážok z pretrvávajúcich upršaných po sebe idúcich dní až týždňov spolu spojeným čiastočným topením snehu z vyšších polôh následkom zvyšovania teploty. V mesiacoch september a október, kedy nachádzame najvyššiu OAR pre Prameň v potôčiku sa inak čísla pohybujú okolo priemernej hodnoty rovnako aj u druhého prameňa. Bolo vtedy síce zaregistrovaných pár dní s intenzívnymi zrážkami, ale dažde netrvali neustále počas niekoľkých dní. Najnižšie objemové aktivity pre oba pramene sme dostali pre koniec novembra až začiatok decembra.

Patrovce v Zádvorí			
Dátum	Prietok [l/min]	Teplota [°C]	Obj. aktivita [Bq/l]
29.3.2015	3,61	7,6	29,6 ± 1,6
26.9.2015	3,78	12,8	34 ± 1,7
3.10.2015	3,81	11,9	30,7 ± 1,9
10.10.2015	4,12	11,4	33,2 ± 1,8
18.10.2015	4,16	10,9	31,8 ± 1,7
22.11.2015	4,32	8,8	28,9 ± 1,5
29.11.2015	3,83	8,5	32,1 ± 1,6
5.12.2015	3,82	8,9	28 ± 2
13.12.2015	3,98	8,2	35,5 ± 1,8
20.12.2015	4	8,1	32,4 ± 1,9
9.1.2016	3,38	6	30,4 ± 1,7
31.1.2016	3,75	6,6	35,9 ± 1,8
15.2.2016	4,03	6,9	36,9 ± 2,1
22.2.2016	4,09	6,8	30,5 ± 1,7
28.2.2016	3,74	7,3	29 ± 1,6
14.3.2016	3,65	7,6	33,9 ± 1,7
21.3.2016	3,61	7,6	32,5 ± 1,8
priemer	3,86	8,6	31,9
rozptyl	0,23	1,9	2,5

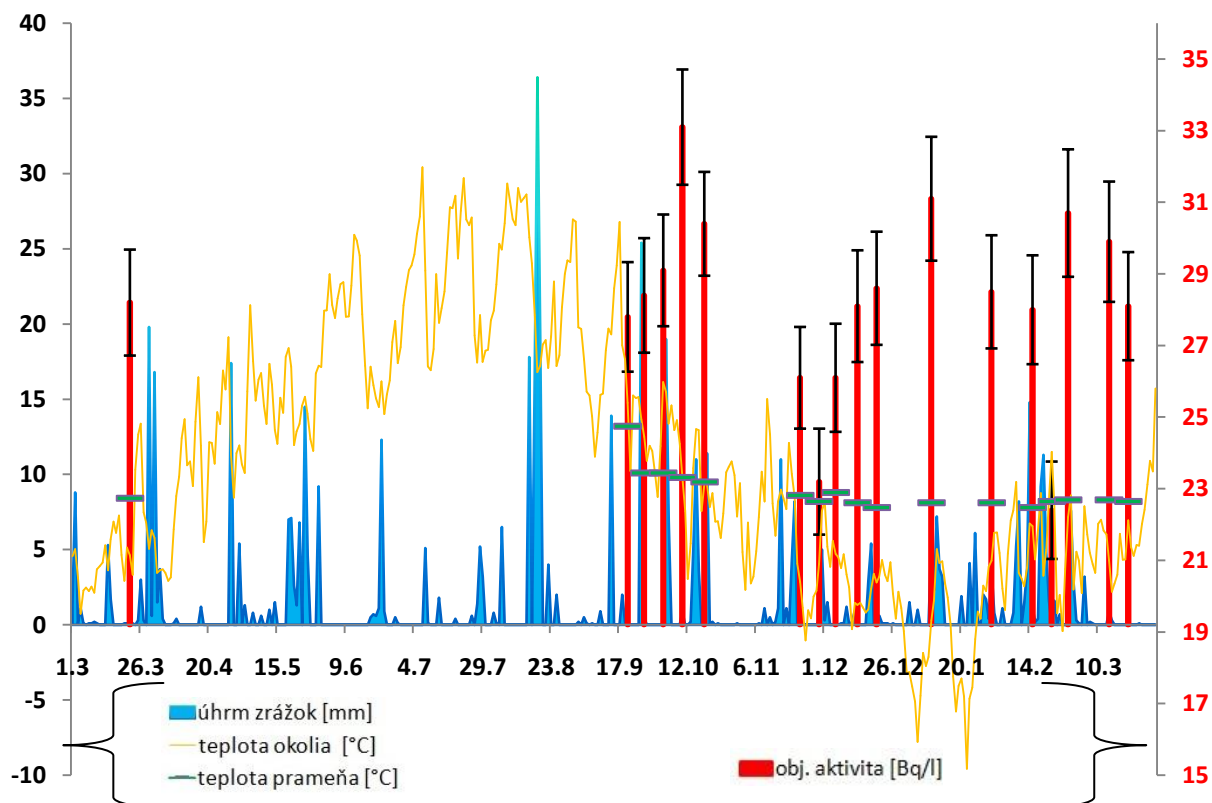
Tab. 1 : Prietok, teplota a OAR prameňa Patrovce v Zádvorí počas sledovaného obdobia

Prameň v potôčiku		
Dátum	Teplota [°C]	Obj. aktivita [Bq/l]
22.3.2015	8,4	28,2 ± 1,5
20.9.2015	13,2	27,8 ± 1,5
26.9.2015	10,1	28,4 ± 1,6
3.10.2015	10,1	29,1 ± 1,6
10.10.2015	9,8	33,1 ± 1,6
18.10.2015	9,5	30,4 ± 1,5
22.11.2015	8,6	26,1 ± 1,4
29.11.2015	8,2	23,2 ± 1,5
5.12.2015	8,8	26,1 ± 1,5
13.12.2015	8,1	28,1 ± 1,6
20.12.2015	7,8	28,6 ± 1,6
9.1.2016	8,1	31,1 ± 1,7
31.1.2016	8,1	28,5 ± 1,6
15.2.2016	7,8	28 ± 1,5
22.2.2016	8,2	22,4 ± 1,4
28.2.2016	8,3	30,7 ± 1,8
14.3.2016	8,3	29,9 ± 1,7
21.3.2016	8,2	28,1 ± 1,5
priemer	8,9	28
rozptyl	1,3	2,5

Tab. 2 : Teplota a OAR Prameňa v potôčiku počas sledovaného obdobia



Obr. 5 : Graf prameňa Patrovce v Zádvorí znázorňujúci závislosť jeho OAR, teploty a výdatnosti od meteorologických podmienok za dlhšie časové obdobie



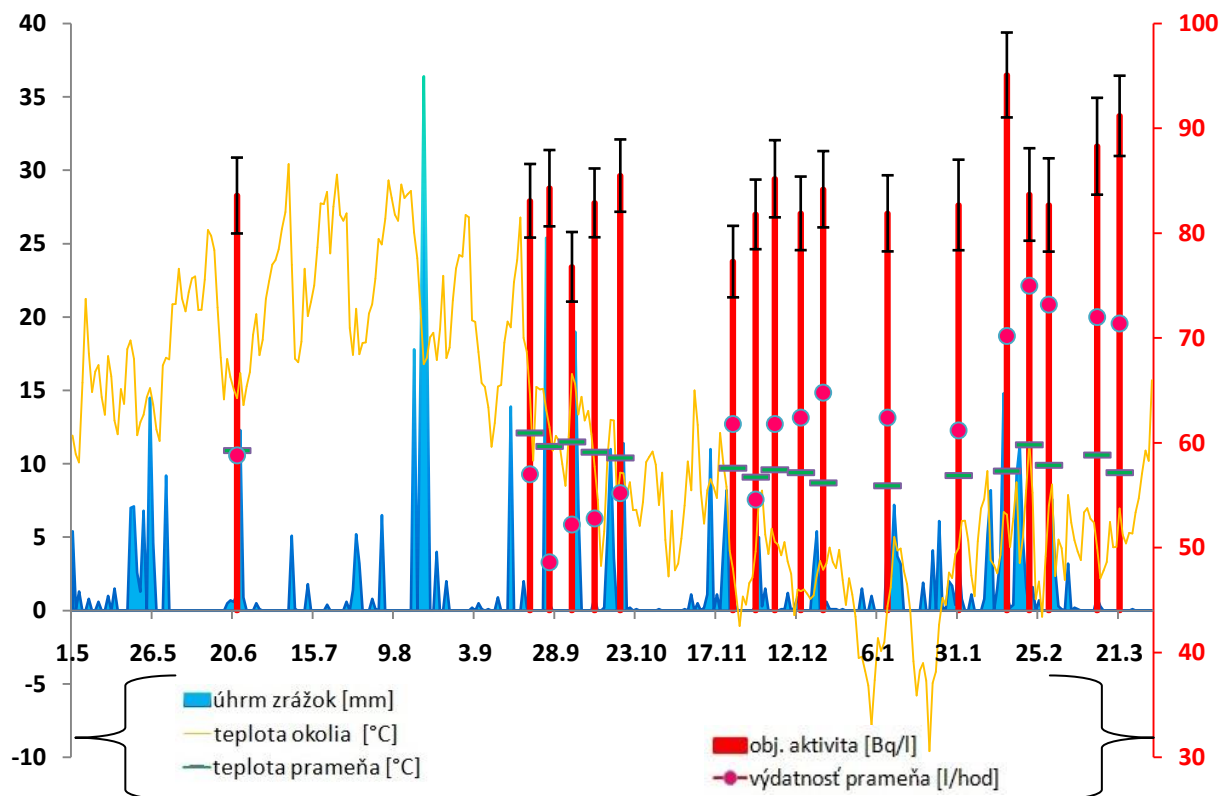
Obr. 6 : Graf Prameňa v potôčiku mlyn znázorňujúci závislosť jeho OAR a teploty od meteorologických podmienok za dlhšie časové obdobie

Dolňanská kyselka			
Dátum	Prietok [l/min]	Teplota [°C]	Obj. aktivita [Bq/l]
21.6.2015	0,98	10,9	83,6 ± 3,6
20.9.2015	0,95	12,1	83,1 ± 3,5
26.9.2015	0,81	11,2	84,3 ± 3,6
3.10.2015	0,87	11,5	76,8 ± 3,3
10.10.2015	0,88	10,8	82,9 ± 3,3
18.10.2015	0,92	10,4	85,5 ± 3,5
22.11.2015	1,03	9,7	77,3 ± 3,4
29.11.2015	0,91	9,1	81,8 ± 3,3
5.12.2015	1,03	9,6	85,2 ± 3,7
13.12.2015	1,04	9,4	81,9 ± 3,5
20.12.2015	1,08	8,7	84,2 ± 3,6
9.1.2016	1,04	8,5	81,9 ± 3,6
31.1.2016	1,02	9,2	82,7 ± 4,3
15.2.2016	1,17	9,5	95,1 ± 4,1
22.2.2016	1,25	11,3	83,7 ± 4,4
28.2.2016	1,22	9,9	82,7 ± 4,5
14.3.2016	1,2	10,6	88,3 ± 4,6
21.3.2016	1,19	9,4	91,2 ± 3,8
priemer	1,02	10,1	83,6
rozptyl	0,13	1	4,2

Tab. 3 : Prietok, teplota a OAR Dolňanskej kyselky počas sledovaného obdobia

Ďalším pozorovaným prameňom je Dolňanská kyselka. Je zo všetkých vyšetovaných prameňoch umiestnený najsevernejšie a z geografického hľadiska sa síce nezaraduje k pohoriu Považský Inovec, ale patrí do daného regiónu. Do tejto práce bol zaradený aj z toho dôvodu, že vykazuje zvýšenú OAR a podložie na ktorom sa nachádza, piesčité hliny a štrky z útvaru kvartér, sa nachádzajú aj na území Považského Inovca. Vzhľadom na okolité detské ihrisko sa dá predpokladať, že je aj zdrojom pitnej vody napriek výraznému zápachu pochádzajúceho z obsahujúceho sírovodíka H_2S . Najnižšia OAR bola nameraná 3.10. 2015 s hodnotou $(76,8 \pm 3,3) Bq.l^{-1}$ a najvyššia $(95,1 \pm 4,1) Bq.l^{-1}$ dňa 15.2.2016 (tab. 3). Aj tentoraz nám najvyššie hodnoty OAR spadajú do druhej polovice februára a väčšina nižších do novembra napriek tomu, že najnižšia hodnota bola opäť nameraná v októbri (obr. 7).

Treba poznamenať, že hodnoty úhrnov zrážok použitých pri týchto troch vyššie spomenutých kyseliak nie presne zodpovedajú skutočnosti, keďže použité dáta boli zo stanice Piešťany. Napriek tomu sa dajú považovať za vierohodné a možno predpokladať, že pri vyšších úhrnoch zrážok nešlo len o miestne prehánky a dážď zasiahol celú oblasť viac menej rovnomerne.



Obr. 7 : Graf Dolňanskej kyselky znázorňujúci závislosť jeho OAR, teploty a výdatnosti od meteorologických podmienok za dlhšie časové obdobie

Posledné sledované pramene sú Duranov mlyn a Dastínska kyselka. Duranov mlyn sa nachádza neďaleko Piešťan a vzdušnou čiarou približne 7,5 km od polohy Dastínskej kyselky umiestnenej smerom do vnútra pohoria. Duranov mlyn leží na rovnakom type podložia, ktoré tvoria piesčité hliny, štrky z útvaru kvartér ako Dolňanská kyselka a vyznačuje sa aj podobnou, taktiež zvýšenou objemovou aktivitou radónu vo vode (obr. 3). Podložie Dastínskej kyselky, ktorá sa nachádza na rozhraní dvoch typov podložia, sčasti tvoria kyslé vyvreté horniny sukcesie kryštalinika patriacej do tektonickej jednotky tatrika všeobecne sa vyznačujúce najvyššími koncentraciami rádia a fluvialne sedimenty typu piesčité hliny a štrky, spomenuté už pri vyššie vymenovaných prameňoch. Magmatické horniny tvoria granitoidy, no vzhľadom na to, že sú charakterizované v danej oblasti s nízkym radónovým rizikom (obr. 4), môžeme predpokladať, že k obohacovaniu tejto vody o radón dochádza práve cez fluvialne sedimenty. Prameň disponuje najvyššími nameranými hodnotami OAR, pričom v niektorých dňoch merania hodnoty presiahli $200 Bq.l^{-1}$.

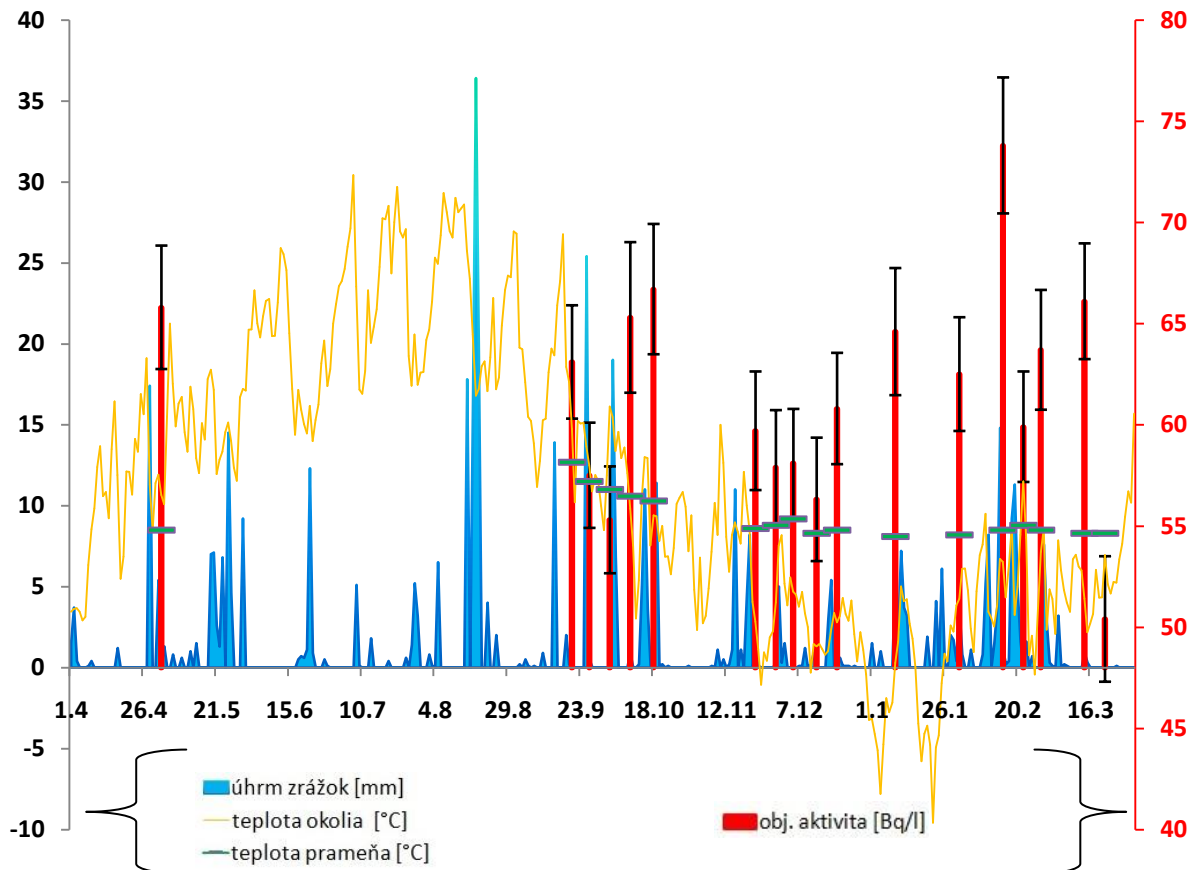
Duranov mlyn		
Dátum	Teplota [°C]	Obj. aktivita [Bq/l]
2.5.2015	8,5	65,8 ± 3,1
20.9.2015	12,7	63,1 ± 2,8
26.9.2015	11,5	57,5 ± 2,6
3.10.2015	11	55,3 ± 2,6
10.10.2015	10,6	65,3 ± 3,7
18.10.2015	10,3	66,7 ± 3,2
22.11.2015	8,6	59,7 ± 2,9
29.11.2015	8,8	57,9 ± 2,8
5.12.2015	9,2	58,1 ± 2,7
13.12.2015	8,3	56,31 ± 3,1
20.12.2015	8,5	60,8 ± 2,8
9.1.2016	8,1	64,6 ± 3,1
31.1.2016	8,2	62,5 ± 2,8
15.2.2016	8,5	73,8 ± 3,4
22.2.2016	8,8	59,9 ± 2,7
28.2.2016	8,5	63,7 ± 2,9
14.3.2016	8,5	66,1 ± 2,9
21.3.2016	8,3	50,4 ± 3,1
priemer	9,3	61,1
rozptyl	1,3	5,2

Tab. 4 : Teplota a OAR prameňa Duranov mlyn počas sledovaného obdobia

Dastínska kyselka			
Dátum	Prietok [l/min]	Teplota [°C]	Obj. aktivita [Bq/l]
2.5.2015	2,26	9,9	183 ± 9,2
20.9.2015	2,38	11,1	201 ± 7,9
26.9.2015	2,17	10,8	210 ± 8,4
3.10.2015	2,25	11,2	189 ± 7,4
10.10.2015	2,34	10,5	198 ± 7,7
18.10.2015	2,3	10,4	183 ± 7,1
22.11.2015	2,25	9,5	181 ± 9
29.11.2015	2,09	9,8	201 ± 8,3
5.12.2015	2,07	9,8	202 ± 7,9
13.12.2015	2,17	9,6	192 ± 7,9
20.12.2015	0,41	9,7	191 ± 7,5
9.1.2016	1,98	9,2	178 ± 8,9
31.1.2016	1,99	9	182 ± 6,9
15.2.2016	2,29	9,5	197 ± 7,6
22.2.2016	2,44	9,9	202 ± 7,9
28.2.2016	2,29	9,7	192 ± 7,7
14.3.2016	2,25	10	213 ± 8,3
21.3.2016	2,25	9,8	191 ± 9,5
priemer	2,12	9,97	193, 6
rozptyl	0,43	0,6	9,8

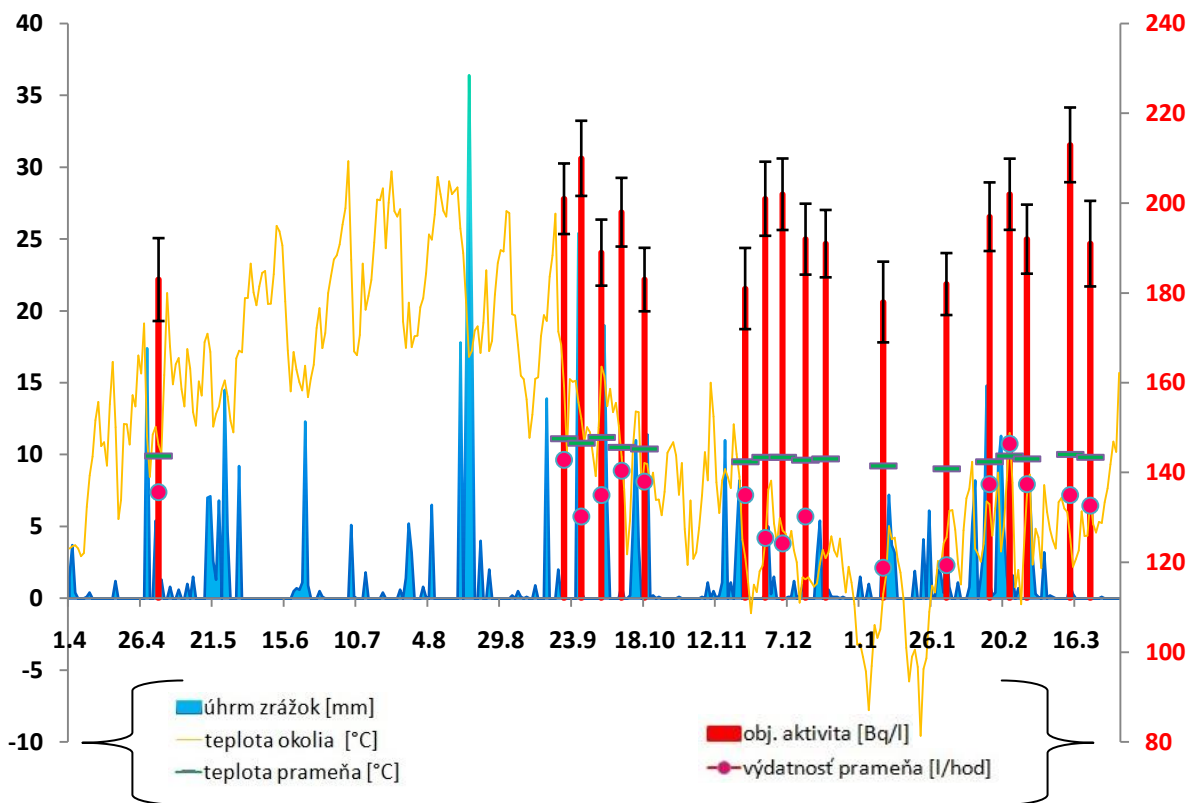
Tab. 5 : Prietok, teplota a OAR Dastínskej kyselky počas sledovaného obdobia

Najvyššia nameraná hodnota OAR pre prameň Duranov mlyn bola 15.2.2016 s hodnotou $(73,8 \pm 3,4)$ Bq.l^{-1} a najnižšia $(50,4 \pm 3,1)$ Bq.l^{-1} dňa 21.3.2016 (tab. 4). Podobne pre Dastínsku kyselku najvyššia hodnota $(213 \pm 8,3)\text{Bq.l}^{-1}$ dňa 14.3.2016 a najnižšia hodnota $(178 \pm 8,9)$ Bq.l^{-1} dňa 9.1.2015 (tab. 5). Viditeľne najnižšie hodnoty OAR v prípade prameňa Duranov mlyn sú dosahované koncom novembra až začiatkom decembra. Najvyššie hodnoty OAR opäť zaznamenávame na konci februára 2016 (obr. 8). Stanovenie obdobia, kedy sa pozorujú najvyššie a kedy najnižšie OAR pre Dastínsku kyselku nie je úplne jednoznačné. Napriek veľkým osciláciám hodnôt s rozptylom $9,8 \text{ Bq.l}^{-1}$, nie sú pozorované extrémne odchýlky od dlhodobého priemeru pri konkrétnom meraní ako pri ostatných prameňoch. Dá sa však povedať, že najnižšie hodnoty badať v druhej polovici decembra a koncom októbra, najvyššie koncom februára resp. v druhej polovici septembra (obr.9).



Obr. 8 : Graf prameňa Duranov mlyn znázorňujúci závislosť jeho OAR a teploty od meteorologických podmienok za dlhšie časové obdobie

Pri prvotných odberoch vzoriek vykonaných koncom marca pre kyselky Patrovce v Zádvorí a Prameň v potôčiku sme zaznamenali hodnoty OAR pod dlhodobým priemerom, v prípade počiatočných odberov ostaniých vôd ktoré boli uskutočnené začiatkom mája a v júni sa tieto hodnoty pohybujú na úrovni priemeru. Dni až týždne pred rozborom v marci nie je zaznamenaných veľa dní s výraznými zrážkami, naopak pred odbermi v máji a v júni počet predchádzajúcich daždivých dní narastá.



Obr. 9: Graf Dastínskej kyselky znázorňujúci závislosť jeho OAR, teploty a výdatnosti od meteorologických podmienok za dlhšie časové obdobie

7 Záver

Zmapovali sme OAR v 41 prameňoch Považského Inovca. Počas obdobia 7 mesiacov sme priebežne odoberali vzorky vôd a určovali OAR piatich prameňov spadajúcich do danej lokality. Vybrali sme ich na základe ich OAR, ktorá bola zvýšená, aby sme mohli lepšie sledovať variácie OAR týchto vodách.

Všeobecne najnižšie hodnoty OAR sme zaevidovali koncom novembra a prvý decembrový týždeň. Najvyššie hodnoty sa dosahovali koncom februára. Voda pochádzajúca z intenzívnych dažďových zrážok a z topenia sa snehu mohla preniknúť cez pôdne a horninové prostredie až do hĺbky, ktorou dané pramene pretekajú predtým, než vyvrú na povrch. Dažďová voda a topiaci sa sneh pri presakovaní do pórov a puklín v pôde a v hornine sa postupne obohacovala o radón, ktorý sa nachádzal vo vzduchu pórov a tak umožnila jeho transport do prostredia prameňov. Práve v tomto období sme pozorovali vyššie objemové aktivity radónu v odobratých vodách. Počas sledovaných mesiacov sme zaznamenali aj maximá aj minimá radónu vo vode. Ďalšie merania ukážu, či sa jedná len o lokálne variácie alebo nadobudnú sezónny charakter.

Pri meraniach v našom časovom intervale sme zaznamenali určitú spojitosť medzi množstvom vody v pôde a nárastom OAR v prameňoch. Takisto sme overili súvislosť medzi celkovou OAR vo vodách a podloží, ktorým voda preteká.

Pod'akovanie

Chcela by som sa poďakovať svojej školiteľke RNDr. Monike Müllerovej, PhD. za jej cenné pripomienky a usmerňovanie pri práci.

Literatúra

- [Böhm, 2007] Böhm R. (2007), Radón a jeho produkty premeny : <http://www.skola.sk/podporovane-projekty/fyzika-okolo-nas/materialy.htm> (26.3.2016)
- [Daniel a kol., 1996] Daniel, J., Lučivjanský, L., Stercz, M., Geochemický atlas Slovenska, časť IV: Prírodná rádioaktivita hornín. Geologická služba Slovenskej republiky, Bratislava, 1996
- [Frengstad et al., 2003] Frengstad B., Skrede A. K., Krog J. R., Strand T., Lind B., Banks D., (2003): Radon in potable groundwater: examples from Norway. In: Břilviken, B.: Natural Ionizing Radiation and Health. Proceedings from a symposium held at the Norwegian Academy of Science and Letters, Det Norske Videnskaps/Akademi, Oslo 2003
- [GUDS] -http://www.geology.sk/new/sk/sub/ms/zoz_apl (26.3.2016)
- [Gudzenko, Dubincuk, 1987] Gudzenko, V.V., Dubincuk V.T.: Izotopy rádia a radónu v prírodných vodách. Nauka. Moskva. 1987, 158 p. (in Russian)
- [Holý, 2002] Holý, K., Aplikácie niektorých rádionuklidov v enviromentálnych štúdiách, Zborník 4. Banskoštiavnické dni, Banská Štiavnica, 2002, pp. 24-28
- [Holý, 2009] Holý, K.: Prírodné zdroje ionizujúceho žiarenia, Slovenská nukleárna spoločnosť, 2009 (online): http://www.edu.snus.sk/ucebnice/Holy_Tolgyessy-ZDROJE_IZ.pdf
- [Igarashi, Saeki, Takahata, Sumikawa, Tasaka, Sasaki, Takahashi, Sano, 1995] Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., Sano, Y., Ground-Water Radon anomaly Before The Kobe Earthquake in Japan. Science, New series, American association for the advancement of science, Vol. 269, No. 5220. Jul. 7, 1995, p. 60 - 61
- [Ishimori, Lange, Martin, Mayya, Phaneuf, 2013] Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, S.Y., Phaneuf, M., Measurement and calculation of radon releases from NORM residues, International atomic energy agency, Vienna 2013. p. 47
- [kyselky] - <http://www.visittrencin.sk/tema/kyselky-v-trencine-okoli>
- [laznejachymov] - <http://www.laznejachymov.cz/cim-lecime/> (27.3.2016)
- [LeGrand, 1987] LeGrand H. (1987). Radon and Radium Emanations from Fractured Crystalline Rocks - a Conceptual Hydrogeological Model. Ground Water, Vol. 25, No. 1, 1987
- [Lučivjanský, 1997] Lučivjanský L., Prírodná rádioaktivita vôd Slovenska. Zborník 1. konferencie: Rádioaktivita v životnom prostredí, Spišská Nová Ves: 1997
- [Mahel', 1986] Mahel' M. (1986). Geologická stavba československých Karpát. Geologický ústav Dionýza Štúra SAV, Bratislava: Veda 1986
- [Markkanen, Arvela, 1992] Markkanen, M., Arvela, H.: Radon emanation from soils. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45, No. 2, 1992, pp. 269 – 272
- [Müllerová, 2008] Müllerová M.(2008). Stanovenie objemovej aktivity ^{222}Rn vo vzduchu: Návody na cvičenia z Radiometrických meraní. Bratislava: FMFI UK 2008
- [Nazaroff, 1992] Nazaroff, W.W., Radon transport from soil to air. Reviews of geophysics 1992, vol. 30, no. 2, p. 137-160, 1992
- [Nazaroff, Moed, Sextro, 1988] Nazaroff, W.W., Moed, A. B., Sextro, G. R.: Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration and Entry, In Radon and its Decay Products in Indoor Air, Eds. W. W. Nazaroff and A. W. Nero, New York: John Wiley and Sons 1988
- [PSE 9, 2010] Adobe Photoshop 9, Adobe systems Incorporated, 2001- 1010
- [Serdjukova & Kapitanov, 1969] Serdjukova, A.S., Kapitanov J.T.: Izotopy radona i karotkoživuščije produkty ich razpada v prirode. Atomizdat, Moskva, 1969
- [Smetanová, 2009] Smetanová I. (2009). Variácie objemovej aktivity radónu vo vrtoch a v podzemných priestoroch: Dizertačná práca. Bratislava: Geofyzikálny ústav SAV 2009
- [Surfer 11, 2013] Golden Software, Inc. (2013). Surfer 11
- [UNSCEAR, 1993] United Nations Scientific Committence on the Effects of Atomic Radiations, UNSCEAR Report 1993
- [UNSCEAR, 200] UNSCEAR, Exposures from Natural Radiation Sources. New York 2000
- [Wilkening, 1990] Wilkening, M., Radon in the environment. Department of Physics, New Mexico Institute of mining and technology, Socorro, NM 87801, USA, 1990
- [Zákon č. 528/2007] Zákon č. 528/2007 Z. z. o požiadavkách na obmedzenie ožiarenia z prírodného žiarenia, Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky z 9. septembra 2015