VÝSLEDKY KONTINUÁLNEHO MONITOROVANIA ^{222}Rn A JEHO PRODUKTOV PREMENY VO VNÚTORNOM OVZDUŠÍ

Tomas Stanys, Karol Holý, Ivana Bosá

Matematicko-fyzikálna fakulta Univerzita Komenského, Mlynská dolina F1, 842 48 Bratislava

Súhrn

Objemová aktivita ^{222}Rn a jeho produktov premeny vykazuje v ovzduší pobytových priestorov denné a sezónne variácie. Ich meranie a štúdium umožňuje lepšie pochopiť mechanizmy ovplyvňujúce koncentráciu ^{222}Rn, testovať modely popisujúce variácie, identifikovať a kvantifikovať zdroje ^{222}Rn v pobytových priestoroch, upresňovať postupy pri meraní koncentrácie ^{222}Rn integrálnymi metódami a vyhodnocovaní údajov z týchto meraní, kontrolovať účinnosť protiradónových opatrení a pod. Počas obdobia viac ako jeden rok bol kontinuálne monitorovaný ^{222}Rn a jeho krátkožijúce produkty premeny v jednej pracovnej miestnosti. Miestnosť bola na 2. poschodí a s oknami orientovanými na sever, pričom proti priamemu vplyvu vetra bola chránená ďalšími časťami budovy. Miestnosť je typom pracovného pobytového priestoru často sa vyskytujúceho v našej republike. Namerané údaje sme analyzovali pomocou multiparametrického modelu. Pre modelovanie vstupu radónu do vnútorného ovzdušia sme využili simultánne meranie meteorologických parametrov vo vnútornom ovzduší (teplota, atmosfericky tlak) a vo vonkajšej atmosfére (teplota, atmosferický tlak, rýchlosť a smer vetra). Na overenie modelu sme uskutočnili aj niekoľkotýždňové merania v troch rôznych pobytových priestoroch, ktoré sa líšili spôsobom vetrania, pomerom medzi objemom miestnosti a exhalačnou plochou.

1. Úvod

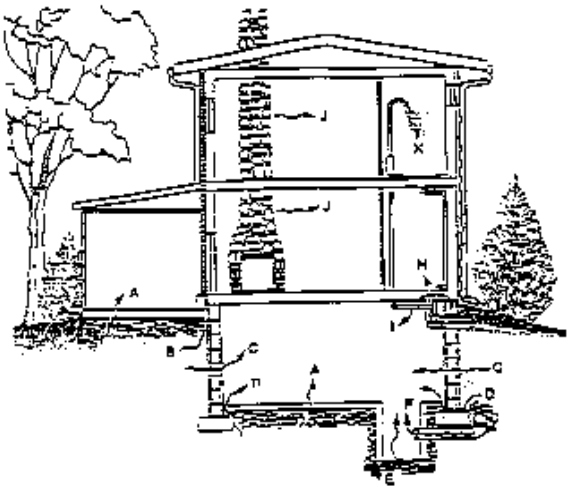
V súčasnosti je veľká pozornosť venovaná ochrane zdravia obyvateľstva pred ionizujúcim žiarením. ^{222}Rn (radón) a jeho produkty premeny produkujú najväčší príspevok k radiačnej záťaži obyvateľstva. Podľa údajov UNSCEAR (United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation) [1] podiel týchto rádionuklidov na celkovej radiačnej záťaži obyvateľstva je až 55%. Najväčšie nebezpečenstvo predstavujú produkty premeny radónu, ktoré sa inhaláciou koncentrujú na pomerne malú plochu dýchacích ciest, ožarujú bazálne bunky pľúcneho epitelu a tým zvyšujú pravdepodobnosť poškodenia DNA s následným vznikom zhubného nádoru. Radón a torón môže v dôsledku dobrej rozpustnosti v tuku exponovať kostnú dreň (hlavne u mladšej populácie) a tým zvyšovať riziko vzniku leukémie [2].

Radón ako inertný plyn ľahko preniká do vnútorných priestorov, kde sa kvôli pomerne dlhej dobe polpremeny môže koncentrovať a vytvárať vnútornú mikroklímu negatívne pôsobiacu na zdravie človeka. Stavebné materiály s vyššou koncentráciou rádia v kombinácii s nevhodným ventilačným systémom budovy môžu byť príčinou vysokých koncentrácií radónu a jeho produktov premeny vo vnútornom ovzduší. Dlhodobé integrálne merania poskytujú informácie o priemernej objemovej aktivite a umožňujú odhad radiačnej záťaže [3], avšak rýchla kontrola výskytu nebezpečne vysokých koncentrácii radónu, určovanie dominantných zdrojov a návrhy možných opatrení si vyžaduje dobrú znalosť dynamiky transportu radónu vo vnútorných priestoroch. Na tieto účely sú vypracované multiparametrické modely umožňujúce popísať priebeh koncentrácie radónu v závislosti od meteorologických parametrov a špecifík budovy.

2. Teoretická časť

Radón a torón sa do uzavretých priestorov dostavajú exhaláciou z podlahy, stien, stropu alebo z prítomných predmetov, a ďalej z vody používanej v domácnosti, zo spalovania prírodného plynu a vzduchom vstupujúcim do miestnosti (Obr. 1). Rýchlosť prísunu radónu do vnútorného ovzdušia závisí od podložia, konštrukcie stavby, stavebných materiálov a meteorologických podmienok. Stavebné materiály, používaná voda v domácnosti, plyn, vonkajšia atmosféra väčšinou nie sú zdrojmi vysokého prísunu radónu. Avšak v niektorých špeciálnych prípadoch boli namerané vysoké hodnoty objemovej

aktivity radónu (OAR) spôsobené prísunom radónu zo stavebných materiálov a z vody používanej v domácnosti [4].



A – difúzia, B – prestupy v základovej konštrukcii, C – trhliny v murive,
D – styk podlahovej a stenovej konštrukcie, E – pôdny radón
F – kanalizácia, G – spoje v murive, H – spoje v podlahe,
I – prestupy v základovej konštrukcii, J – stavebý materiál
K – úžitková voda

Obr. 1 Zdroje radónu vo vnútornom prostredí

Zdroje radónu vo vnútornom ovzduší môžeme rozdeliť na dve kategórie: pasívne zdroje, nezávisiace od rozdielu tlaku a aktívne zdroje, riadené rozdielom tlaku. Difúzia radónu zo stavebných materiálov a z používanej vody v domácnosti patria k pasívnym zdrojom radónu. Veľké koncentrácie radónu vo vnútornom ovzduší sú však väčšinou spôsobené aktívnym prísunom radónu z pôdneho vzduchu.

Z hľadiska štruktúry a spôsobu prevádzky budov sú dôležité dva aspekty: ventilačný systém budovy a konštrukcia základov. Výmena vzduchu (ventilácia) v budove prebieha tromi spôsobmi: infiltráciou (zvyčajne je definovaná ako nekontrolovaný prísun vzduchu cez praskliny vonkajších stien budovy a základov), prirodzenou ventiláciu (otváraním okien, dverí a pod.) a mechanickou ventiláciou (ventilátory, klimatizácia). Výmenu vzduchu je užitočne rozdeliť na dve komponenty: balancovaná a nebalancovaná. Kým balancovaná výmena nezávisí od rozdielu tlaku cez obal budovy nebalancovaná je riadená týmto rozdielom tlaku.

Konštrukcia základov ovplyvňuje hlavne potencionálne nebezpečenstvo konvektívneho transportu pôdneho radónu do vnútorného ovzdušia. Preto je užitočne špecifikovať budovy podľa spôsobu a stupňa kontaktu s pôdou.

Ak predpokladáme homogénne rozdelenie aktivity radónu v miestnosti, potom časový priebeh ich koncentrácie popisuje diferenciálna rovnica:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{S_v}{V} - C(t)(\lambda + \lambda_v) \qquad (1)$$

kde C(t) - objemová aktivita radónu alebo torónu v miestnosti v čase t,

S_v - celkový prísun radónu do budovy [Bq·s^{-1}],

V - objem miestnosti,

λ_v - ventilačná rýchlosť,

λ - konštanta premeny radónu alebo torónu.

Za predpokladu konštantného prísunu a konštantnej výmeny vzduchu, riešenie rovnice (1) vyzerá nasledovne:

$$C(t) = \frac{S_v}{V(\lambda + \lambda_V)}\left(1 - e^{-(\lambda+\lambda_V)t}\right) + C(t|_{t=0})e^{-(\lambda+\lambda_V)t} \qquad (2)$$

a pre stacionárny stav:

$$C = \frac{S_v}{V(\lambda + \lambda_v)} \qquad (3)$$

Výmena vzduchu v miestnostiach sa mení v rozsahu $0{,}1 < \lambda_v < 3$ h^{-1}. Konštanta premeny radónu je $\lambda_{Rn} = 7{,}6\ 10^{-3}$ h^{-1} , a tak $\lambda_v >> \lambda_{Rn}$. Z tohoto dôvodu v rovnici (3) konštantu premeny radónu môžeme

zanedbať. Vo všeobecnosti sa S_v a λ_v mení s časom, preto exaktné riešenie diferenciálnej rovnice (1) závisí od funkcií $S_v(t)$ a $\lambda_v(t)$.

Dôležitým parametrom pri vstupe radónu do budovy je rozdiel tlakov vonku-vnútri. Nebalancovaná ventilačná výmena a aktívny prísun radónu silno závisí od gradientu tlaku. Rozdiel tlakov medzi vonkajším prostredím a vnútrom budovy vzniká hlavne v dôsledku dvoch efektov, rýchlosti vetra ("wind effect") a rozdielu teplôt vonku a vnútri ("stack effect") (Obr.2) [5].

V našich výpočtoch sme predpokladali že "wind" and "stack" efekty spôsobujú nebalancovanú výmenu vzduchu, ktorú môžeme popísať turbulentným prúdením [6]:

$$\lambda_{v,u} = \frac{E}{V}\sqrt{\frac{\rho}{2} f_s^2 |T_0 - T_i| + \frac{\rho}{2} f_w^2 v^2} \qquad (4)$$

kde V - objem miestnosti,

E – efektívna prístupová plocha plášťa budovy,

ρ - hustota prúdiaceho vzduchu,

f_s - parameter tepelného rozdielu (stack parameter),

f_w - parameter rýchlosti vetra (wind parameter),

T_0 - teplota vonku,

T_i - teplota vo vnútri.

Aktívny prísun radónu sme vyjadrili rovnicou [6]:

$$S_a = A_s F_s (T_i - T_0)\frac{T_i}{T_0}$$

kde A_s - koncentrácia radónu vo vzduchu prúdiacom do miestnosti (parameter),

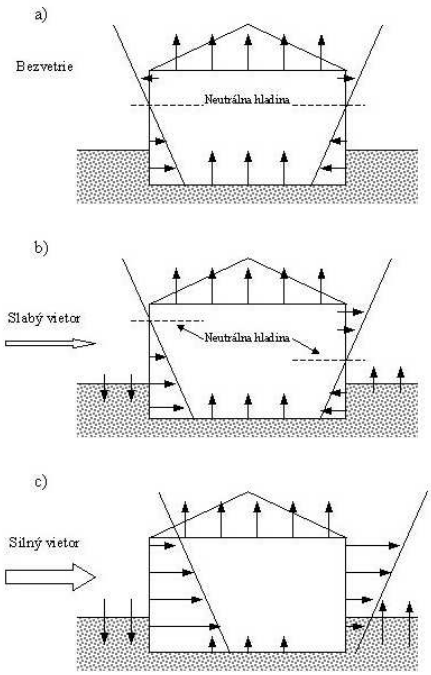
F_s - parameter prísunu,

Ak predpokladáme, že výmenu vzduchu spôsobujú iba "wind" and "stack" efekty potom dosadením rovníc (5) a (4) do riešenia (3) pre stacionárny stav dostaneme vyjadrenie objemovej aktivity radónu:

$$C = \frac{S_p + A_s F_s (T_i - T_0)\frac{T_i}{T_0}}{E\left(\sqrt{\frac{\rho}{2} f_s^2 |T_0 - T_i| + \frac{\rho}{2} f_w^2 v^2}\right)} \qquad (6)$$

kde S_p - pasívny prísun radónu.

Parametre E, f_s, f_w a F_s závisia od špecifík budovy.



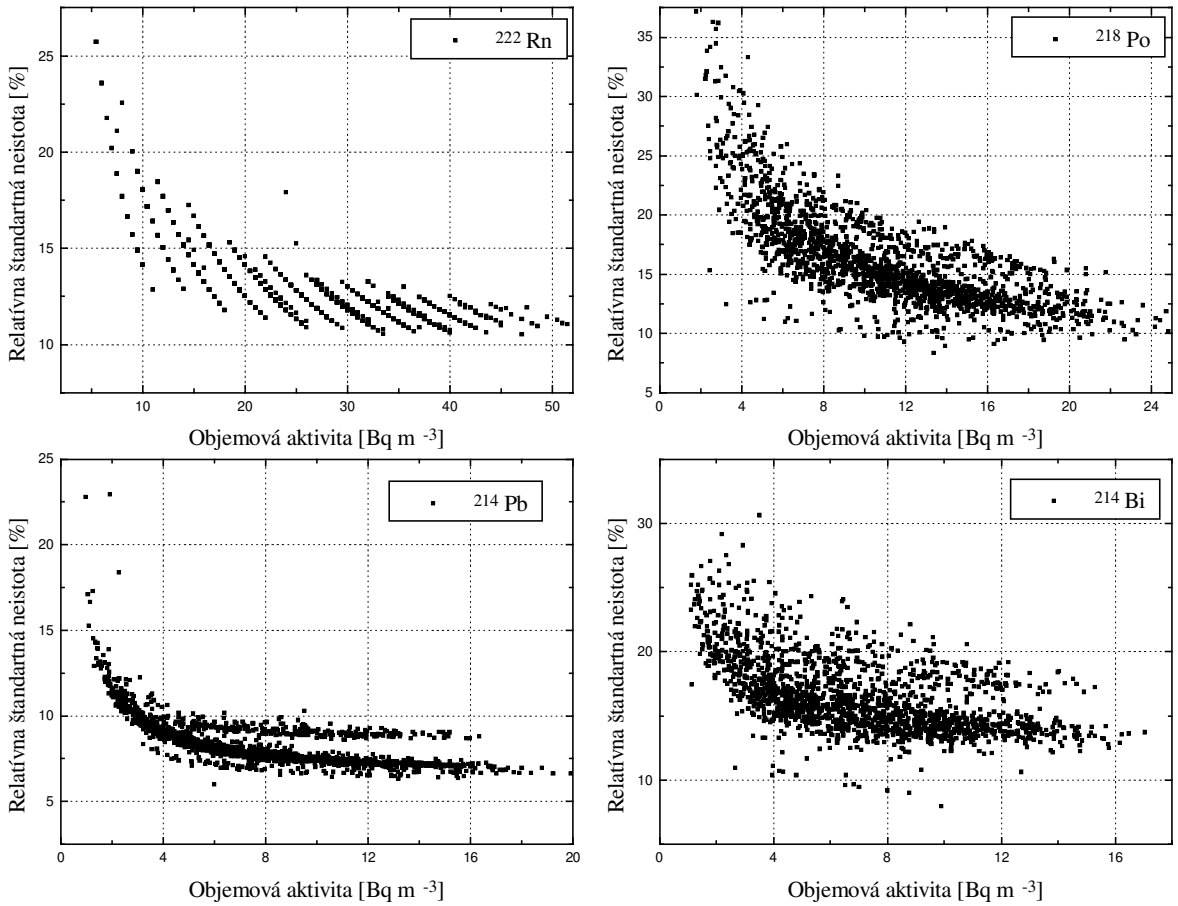
Obr. 2 Schématické znázornenie tlakových rozdielov vonku-vnútri spôsobených a) rozdielmi teplôt b) rozdielmi teplôt a slabým vetrom, c) rozdielmi teplôt a silným vetrom. Šipky určujú smer konvektívneho toku (v smere poklesu tlaku).

3. Experimentálna časť

Počas obdobia viac ako jeden rok bol kontinuálne monitorovaný ^{222}Rn a jeho krátkožijúce produkty premeny v pracovnej miestnosti (ďalej miestnosť č.1). Miestnosť č.1 bola na 2. poschodí, s oknami orientovanými na sever, pričom proti priamemu vplyvu vetra bola chránená ďalšími časťami budovy. Meranie objemovej aktivity ^{222}Rn sa uskutočňovalo radónovým monitorom AlphaGUARD [7]. Monitor zaznamenával priemernú objemovú aktivitu ^{222}Rn v hodinových intervaloch. Objemové aktivity krátkožijúcich produktov premeny ^{222}Rn v ovzduší pobytového priestoru boli merané metódou presávania cez filter. V troch časových intervaloch bola spektrometricky meraná alfa aktivita produktov premeny

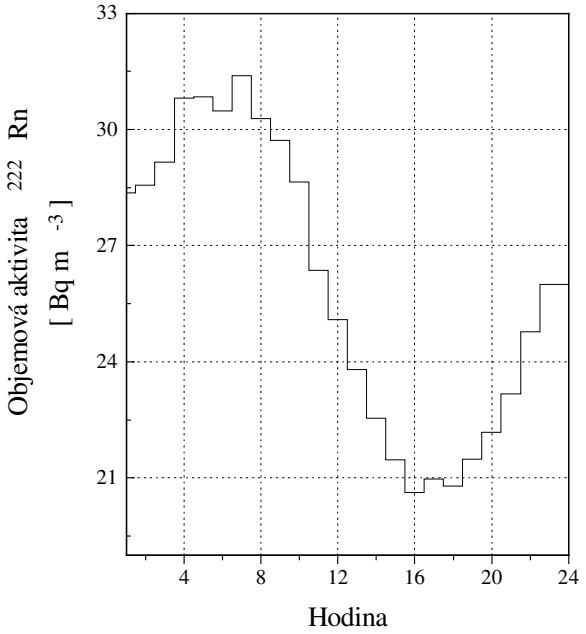
deponovaných na filtri [8]. Merania sa uskutočňovali s frekvenciou 2 hodiny. Meteorologické údaje z vonkajšej atmosféry (rýchlosť a smer vetra, teplota, atmosférický tlak) boli poskytnuté Katedrou meteorológie a klimatológie MFF UK.

V ovzduší pobytového priestoru bolo získaných viac ako 6500 údajov o objemovej aktivity ^{222}Rn a viac ako 1600 údajov o objemových aktivitách krátkožijúcich produktov premeny ^{222}Rn. Napriek tomu, že objemová aktivita radónu v miestnosti č.1 bola pomerne nízka (priemerná objemová aktivita radónu ~26 Bq·m^{-3}, Obr. 8), metodika merania nám umožnila dostatočne presne sledovať zmeny objemovej aktivity. Relatívne neistoty určenia objemovej aktivity radónu a jeho produktov premeny sú uvedené na obrázku 3.

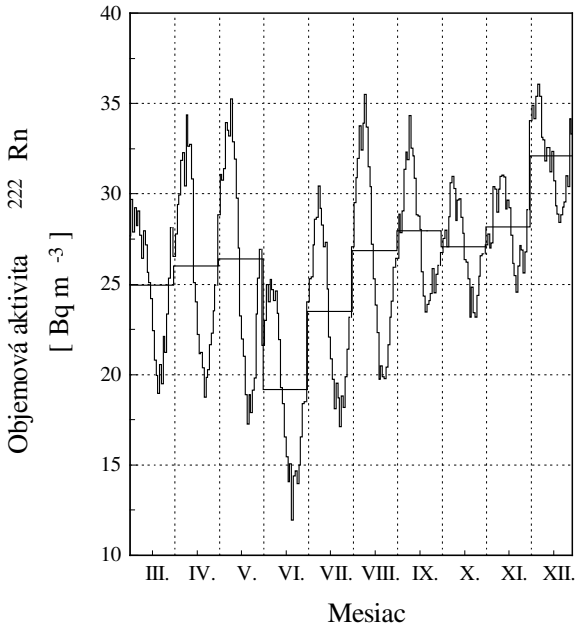


Obr. 3 Relatívne neistoty určenia objemovej aktivity radónu a jeho produktov premeny.

Priebehy objemovej aktivity ^{222}Rn vo vnútornom ovzduší, podobne ako aj vo vonkajšej atmosfére [9], vykazovali denne variácie (Obr.4). Priemerovaním experimentálnych údajov cez celé merané obdobie sme dostali tvar pravidelnej vlny s maximom v ranných hodinách medzi 6 - 8 hodinou a minimom v popoludňajších hodinách medzi 16–18 hodinou (Obr. 5). Najväčšie amplitúdy denných vĺn boli zistené v jarných a letných mesiacoch ($A_{Rn,max}/A_{Rn,min}$ ~ 2) a najmenšie v zimných mesiacoch ($A_{Rn,max}/A_{Rn,min}$ ~ 1,2) (Obr.6).V priebehu roka boli najmenšie priemerné objemové aktivity ^{222}Rn (týždenné a mesačné priemery) namerané v mesiacoch jún a júl a najväčšie v mesiacoch november a december. V ročnom priebehu dosahuje pomer $A_{Rn,max}/A_{Rn,min}$ hodnotu ~2 pre týždenné priemery a hodnotu ~1,8 pre mesačné priemery.

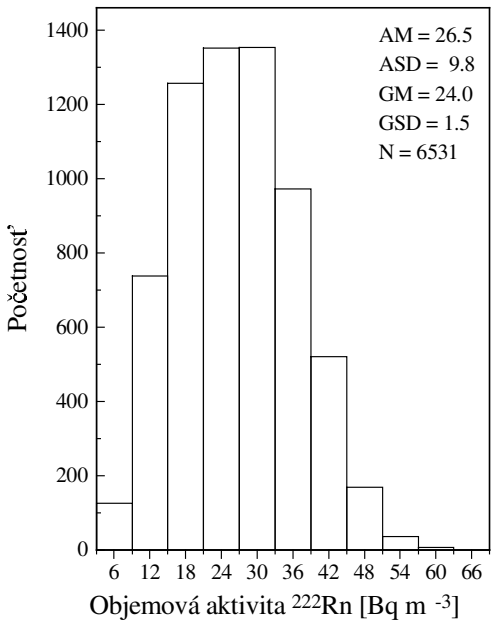


Obr. 5 Priemerný denný priebeh objemovej aktivity ^{222}Rn v miestnosti č. 1 (údaje z obdobia marec 1999 – december 1999).



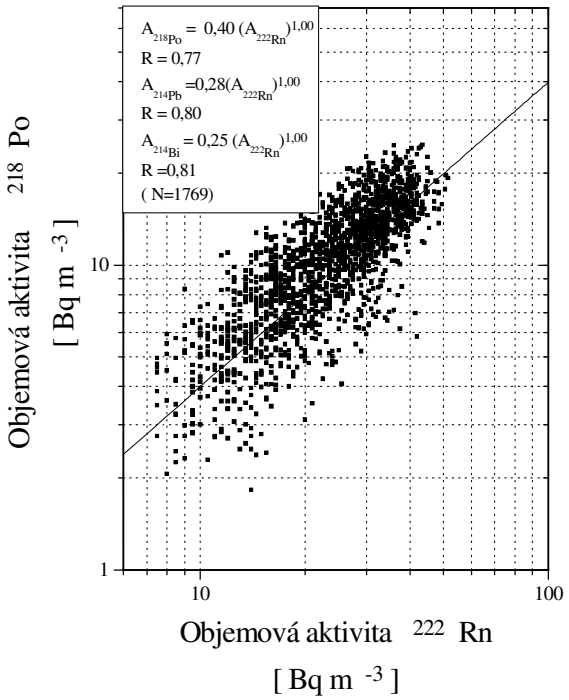
Obr. 6 Priemerné mesačné a priemerné denné priebehy objemovej aktivity ^{222}Rn vo vnútornom ovzduší (miestnosť č. 1).

Stanovené frekvenčné rozdelenie objemových aktivít ^{222}Rn vo vnútornom ovzduší je skôr aproximované Gaussovským rozdelením ako logaritmicko-normálnym (Obr. 8).

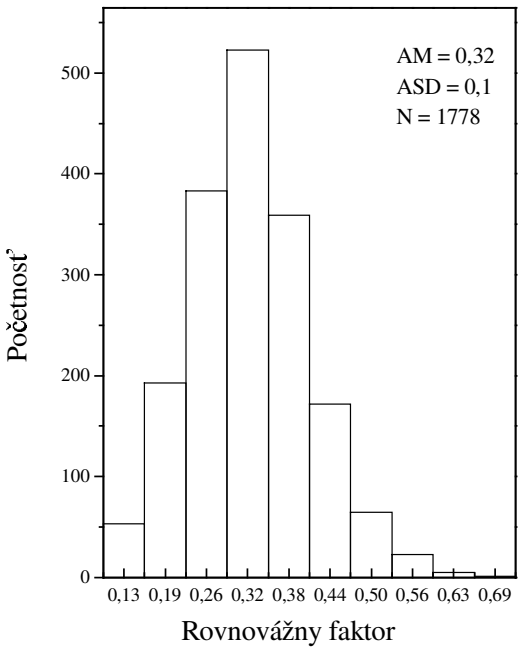


Obr. 8 Frekvenčné rozdelenie objemových aktivít ^{222}Rn v miestnosti č. 1 (jednohodinové merania, údaje z obdobia marec 1999 – december 1999).

Meranie objemových aktivít produktov premeny radónu ukázalo pomerne vysokú koreláciu medzi objemovou aktivitou ^{222}Rn a objemovými aktivitami jeho produktov premeny (Obr.9). Vypočítaný rovnovážny faktor vo vnútornom ovzduší je okolo 0,32 (Obr. 10).

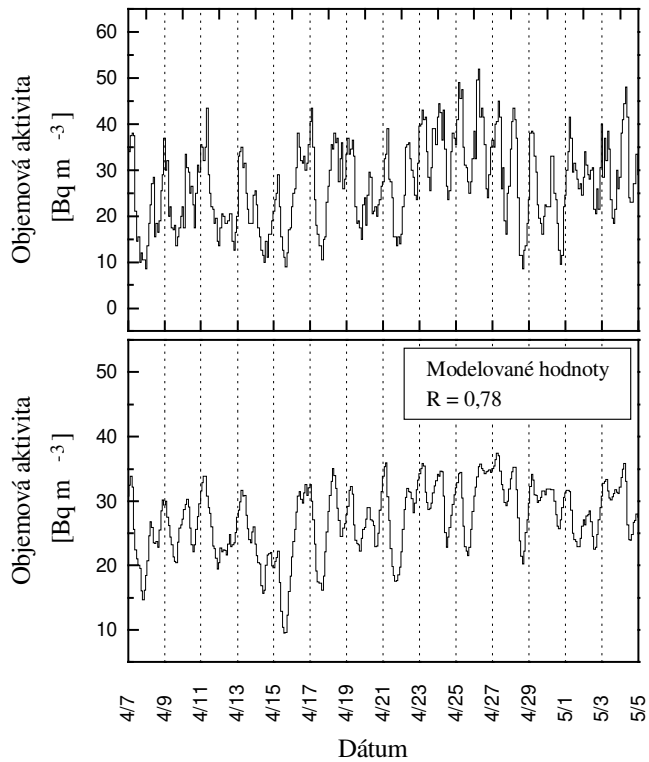


Obr. 9 Korelácia medzi objemovými aktivitami ^{218}Po a ^{222}Rn vo vnútornom ovzduší



Obr. 10 Frekvenčné rozdelenie rovnovážneho faktora (miestnosť č. 1)

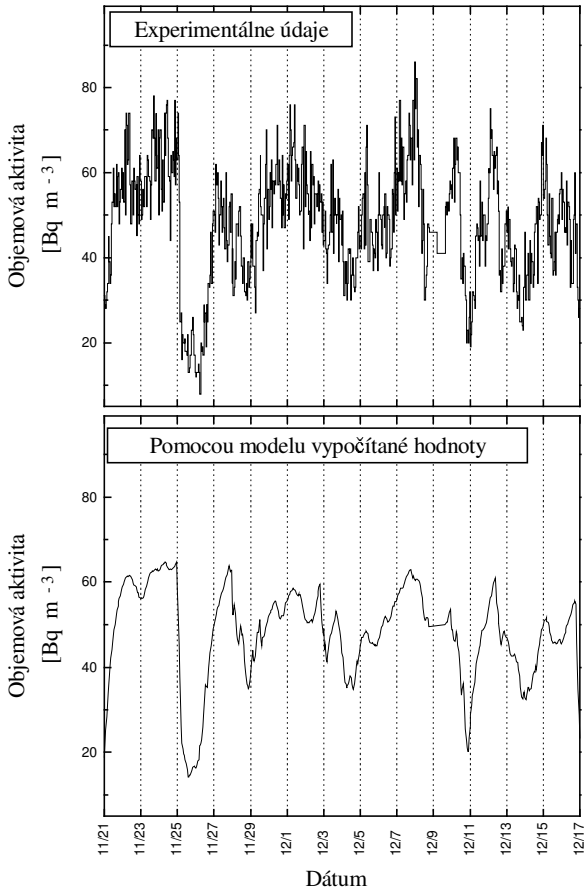
Namerané údaje objemovej aktivity radónu sme analyzovali pomocou hore uvedenej parametrickej rovnice (rovnica č. 6). Pre modelovanie priebehu objemovej aktivity radónu sme využili simultánne meranie meteorologických parametrov vo vnútornom ovzduší (teplota, atmosfericky tlak) a vo vonkajšej atmosfére (teplota, atmosferický tlak, rýchlosť a smer vetra). Optimálne parametre S_p, A_sF_s, E, f_s a f_w sme určovali fitovaním experimentálnych a modelovaných hodnôt. Modelované a experimentálne hodnoty z vybraného obdobia sú uvedené na obrázku 11. Nekontrolované zmeny experimentálnych podmienok, ktoré boli spôsobené pracovnou činnosťou v miestnosti (otváraním okien a dverí) mohli viesť k niektorým odchýlkam experimentálnych a modelom vypočítaných hodnôt. Optimálna hodnota parametru S_p určuje exhaláciu radónu zo stavebných materiálov (stien, stropu, podlahy). Modelom určená exhalácia 1 mBq·m^{-2}s^{-1} v miestnosti č.1 je v dobrom súlade s experimentálne nameranou hodnotou.



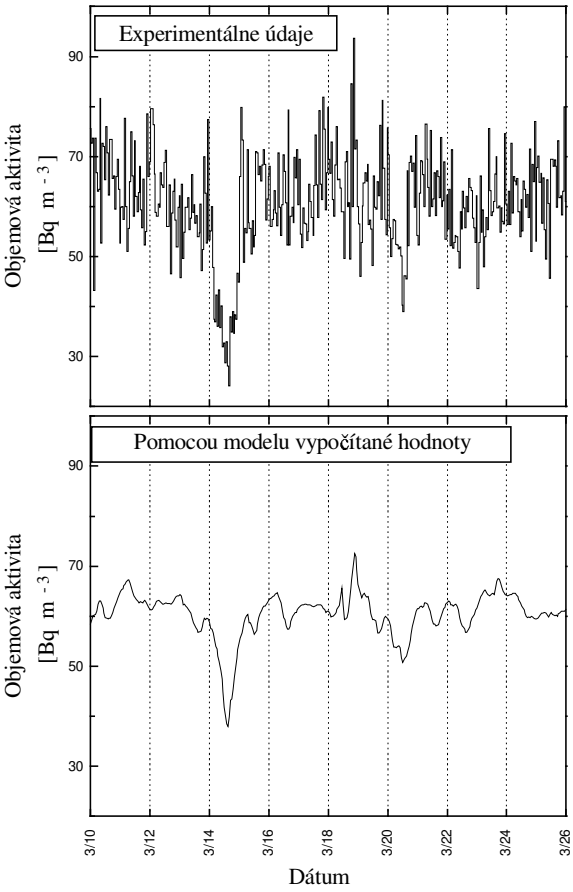
Obr. 11 Experimentálne namerané a modelom vypočítané hodnoty objemovej aktivity radónu v miestnosti č.1

Na overenie platnosti modelu sme uskutočnili niekoľkotýždňové merania v ďalších dvoch rôznych pobytových priestoroch (ďalej miestnosť č.2 a miestnosť č.3). Miestnosť č.2 bola tiež na 2. poschodí, avšak od miestnosti č.1 sa odlišovala vyšším pomerom medzi jej exhalačnou plochou

a objemom, čo sa prejavilo vyššími objemovými aktivitami radónu. Miestnosť č. 2 nebola chránená proti priamemu vplyvu vetra, preto výmena vzduchu závisela nie len od rýchlosti ale aj od smeru vetra, čo bolo zohľadnené pri modelovaní. Porovnanie experimentálne a modelom stanovených hodnôt OAR je na obrázku 12. Miestnosť č.3 bola v suteréne bez okien, steny a podlaha boli v priamom kontakte s pôdou. Napriek relatívne malému pomeru medzi exhalačnou plochou a objemom miestnosti (0,7) priemerná objemová aktivita radónu bola pomerne veľká ~60 $Bq \cdot m^{-3}$ (Obr. 13). Miestnosť nebola vykurovaná, teplota sa počas celej meracej periódy takmer nemenila (10 ^{o}C). Priebeh koncentrácie radónu nevykázal žiadne pravidelne variácie, prudký pokles aktivity radónu 14. marca bol zrejme spôsobený vyššou ventilačnou výmenou kvôli silnému vetru (Obr.13). Popis prísunu radónu do miestnosti v priamom kontakte s pôdou si vyžaduje podrobnejšiu analýzu. Síce namodelované hodnoty objemovej aktivity v miestnosti č. 3 pomerne dobre kopíruje priebeh experimentálnych údajov, hodnoty optimálnych parametrov si vyžadujú experimentálne overenie.



Obr. 12 Experimentálne namerané a pomocou modelu vypočítané hodnoty objemovej aktivity radónu v miestnosti č.2 (R=0,84)



Obr. 13 Experimentálne namerané a pomocou modelu vypočítané hodnoty objemovej aktivity radónu v miestnosti č.3 (R=0,44)

4. Záver

Objemová aktivita radónu a jeho produktov premeny vo vnútornom ovzduší vykazuje denne a sezónne variácie. Denne variácie majú tvar pravidelnej vlny s maximom v ranných hodinách a minimom v popoludňajších hodinách. Najväčšie amplitúdy denných vĺn boli zistené v jarných a letných mesiacoch ($A_{Rn,max}/A_{Rn,min}$ ~ 2) a najmenšie v zimných mesiacoch ($A_{Rn,max}/A_{Rn,min}$ ~ 1,2). V priebehu roka boli najmenšie priemerné objemové aktivity ^{222}Rn (týždenné a mesačné priemery) namerané v mesiacoch

jún a júl a najväčšie v mesiacoch november a december. Napriek odlišným metodikám merania je medzi nameranou objemovou aktivitou radónu a jeho produktov premeny relatívne vysoká korelácia ~ 0,8. Vypočítaný rovnovážny faktor v miestnosti č. 1 je 0,32.

Ako ukazujú experimentálne výsledky, prísun radónu do vnútorného ovzdušia závisí od charakteristík budovy a od meteorologických parametrov. Analýza kontinuálnych meraní pomocou multiparametrického modelu umožňuje stanoviť parametre uzavretého priestoru, od ktorých závisí prísun radónu. Porovnanie našich experimentálnych a vypočítaných údajov ukazuje, že multiparametrický model je možné použiť na predpoveď denných a sezónnych variácii s krátkodobých kontinuálnych meraní. Model v kombinácii s experimentálnym určovaním niektorých parametrov (napr. ventilačnej rýchlosti alebo exhalácie zo stavebných materiálov) je možne využiť aj pre určovanie dominantného zdroja radónu, táto informácia je potrebná pri navrhovaní protiradónových opatrení. Verifikácia tohoto modelu si vyžaduje systematické a dlhodobé merania v rôznych typoch pobytových priestorov, čo je našim ďalším cieľom.

Poďakovanie

Práca bola vypracovaná v ramci riešenia grantových projektov č. 1/4194/97 VEGA MŠ SR a č. UK/142/2000 Grant Univerzity Komenského: "*Správanie sa radónu a jeho produktov premeny v pobytových priestoroch, odhad radiačnej záťaže obyvateľstva*".

LITERATÚRA

[1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations, UNSCEAR Report (1988)

[2] R. B. Richardson et al., Dose to red bone marrow from natural radon and thoron exposure, The British Journal of radiology, 64, 608-624(1991).

[3] M. Vičanová, Pobytové priestory s prekračujúcou zásahovou úrovňou EOAR, Zborník 1 Štiavnické dni (1999)

[4] B. Kahn et al., Searching of buildings materials as sources of elevated radiation dose, Health Physics, 45, 349-361(1983).

[5] W.W. Nazaroff, B.A. Moed and R.G. Sextro, 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).

[6] H. Arvela et al., Comparison of predicted and measured variations of indoor radon concentrations, Rad. Prot. Dosim., 24, 231-235(1988).

[7] V. Genrich V., Alpha Guard PQ 2000/MC 50, Multiparameter Radon Monitor, Genitron Instruments GmbH, Frankfurt, Germany.

[8] T. Stanys, K. Holý, P. Petruf - Alpha spectrometric method for determination of radon and thoron daughter activity concentrations in air, Acta Physica Universitate Comenianae, vol. XXXIX, p.97 (1998).

[9] K. Holý, R. Bohm, I. Bosá, A. Polášková ,O. Holá, ^{222}Rn concentration in the outdoor atmosphere and its relation to the atmospheric stability, In: Proc. of the 21st Rad. Hyg. Days (Ed. D. Nikodemová), Jasná pod Chopkom, Slovakia 1998, pp. 223-226.