

Radon a zdraví

Radon and health

Radon (RADIum emanatiON) je inertní plyn, vznikající radioaktivní přeměnou radia. Nejvýznamnější je radon ^{222}Rn s poločasem rozpadu 3,8 dne, vznikající z radia ^{226}Ra . Radon v termálních pramenech je považován za významný přírodní léčebný zdroj [1]. Radon v atmosféře je jedním z mnoha subtilních dynamických geofaktorů, působících na lidské zdraví (2). Jeho vliv na lidský organizmus je zkoumán zejména v obestavěném, či jinak uzavřeném prostoru. Této otázce je věnován předkládaný článek.

Recenzentka: MUDr. A. Lajčíková, CSc.

1. RADON V ATMOSFÉŘE

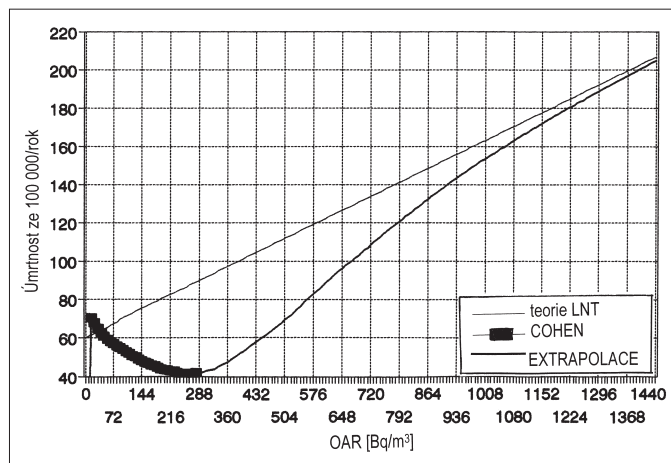
Radon je zdraví nebezpečný v uzavřených, špatně větraných prostorách. Takový stav byl v minulosti běžný v dolech, zejména uranových, dokud nebylo zajištěno jejich dostatečné odvětrávání. Radon sám bezprostředně neškodí. Zhoubné může být usazování iontů jeho dceřiných nuklidů ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi a dalších na aerosol, zachycovaný v dýchacích cestách. Emitované částice alfa jsou při vysokých objemových aktivitách radonu (OAR) příčinou absorpce anomální energie ionizujícího záření v epitelu dýchacích cest. Překročil-li dávka záření, emitovaná vdechovanými ionty dceřiných nuklidů radonu, přípustnou mez, je poškozena DNA v buňkách dýchacích cest a vzniká rakovina plic. Lineární závislost onemocnění horníků rakovinou plic na celkové dávce ionizujícího záření je doložena hygienickoepidemiologickými studiemi [3]. Dosud však není uspokojivě vyřešena otázka „radonového rizika“ v bytech. Radonový program vychází z „teorie“ bezprahového škodlivého působení ionizujícího záření (Linear-No Threshold Theory LNT). Ta předpokládá, že každá libovolně malá dávka ionizujícího záření může být škodlivá [3].

„Teorie“ LNT má své odpůrce. Profesori Rockwell a Drobník [4] ve svých výzkumech dokazují, že nízká úroveň záření nemůže způsobit rakovinu. Tělesná teplota, příjem potravy a dýchání způsobují mnohem více mutací DNA, než průměrná přirozená radioaktivita vzduchu. Malé dávky radiace povzbudí imunitní systém, takže zvýšeným dávkám radiace lidský organizmus účinně čelí. Malé dávky radiace, reparační, opraví chyby v DNA. Jestliže dávka radiace reparační kapacitu překročí, dostaví se negativní účinek ozáření.

„Teorie“ LNT je zpochybněna v pracích profesora Cohena (5). Otestoval ji zpracováním statisíců měření OAR (roční integrální dozimetrií) v bytech v 1729 okresech, v nichž žije 90 % populace USA. Soubor zdravotních ukazatelů (zejména úmrtí na rakovinu plic) a průměrných hodnot OAR (objemová aktivita radiační) v jednotlivých okresech Cohen vyhodnotil za léta 1970–1995. Při zpracování vzal v úvahu dalších 54 faktorů (socioekonomických, geomorfologických, klimatologických a dalších). Zjistil, že při OAR v rozmezí 0 až 200 Bq/m^3 snížení OAR zvyšuje pravděpodobnost vzniku rakoviny plic.

Výrazná křivka na obr. 1 je upravena podle Cohena [5], tenká přímková („teorie“ LNT) je převzata z [5]. Křivka navazující na Cohenův výsledek je proložena s uvážením práce [6]. Lineární závislost úmrtnosti horníků na vysokých OAR v dolech je nesporná. Podle obr. 1 však je od určité hodnoty OAR škodlivost dávky ionizující radiace menší, než předpokládá „teorie“ LNT. Při OAR 220 až 260 Bq/m^3 je podle Cohena riziko vzniku rakoviny plic nejmenší. Největší počet Cohenem sledovaných okresů (1 234) se nalázá v rozmezí průměrných hodnot OAR 18 až 92 Bq/m^3 . S OAR klesající v tomto rozmezí stoupá úmrtnost na rakovinu plic z $50 \cdot 10^{-5}$ na $70 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$. S rostoucími průměrnými hodnotami OAR v jednotlivých okresech úmrtnost na rakovinu plic klesá. Průměrné hodnoty vyšší než 148 Bq/m^3 má pouze 62 okresů. V těchto okresech je úmrtnost na rakovinu plic nejvyšší.

Rozpor Cohenova výsledku s „teorií“ LNT má řadu příčin. Ve studiích, vycházejících z platnosti „teorie“ LNT, např. [7], [8], je sledován jediný faktor – OAR. To



Obr. 1 – Porovnání úmrtnosti na karcinom plic (u mužů, včetně kuřáků) s průměrnými hodnotami objemové aktivity radonu OAR v bytech

Výrazná křivka je převzata z (5), je konstruována podle podkladů v 1729 okresech USA. Přímková je převzata z (5), odpovídá teorii LNT. Tenká křivka, navazující na výraznou, je vedena s uvážením výsledků v (6).

je v rozporu se složitostí dynamiky vývoje nádorů, při jejím studiu nelze vycházet ze závislosti účinku jediného faktoru (dávky ionizujícího záření), běžné popř. v toxikologii [9]. Diskutabilní je i prostá sumace radiační zátěže do celkové dávky ionizujícího záření, bez ohledu na intenzitu zátěže a na věk, v němž k radiační zátěži došlo. Je opomenuta variace OAR s časem, doložená i ve studiích [7] a [8].

Radon a jeho dceřiné produkty jsou zdrojem nepřetržité tvorby nových dvojic lehkých atmosférických iontů (LAI). Při zvýšených hodnotách OAR je koeficient unipolarity LAI $P = n^+ / n^-$ (n^+ koncentrace kladných, n^- záporných iontů) blízký jedné. To je považováno za významný příznivý biogenní faktor [9].

Objemová aktivita radonu OAR, stejně jako koncentrace lehkých atmosférických iontů LAI, koreluje s dalšími subtilními dynamickými geofaktory, vesměs závislými na aktivitě Slunce (pole magnetické, elektrické, atmogeochemické a další), které mají variaci s časem a s místem, a komplexně působí na lidský organizmus [2].

2. JAK RADON PRONIKÁ DO OBYTNÝCH PROSTOR

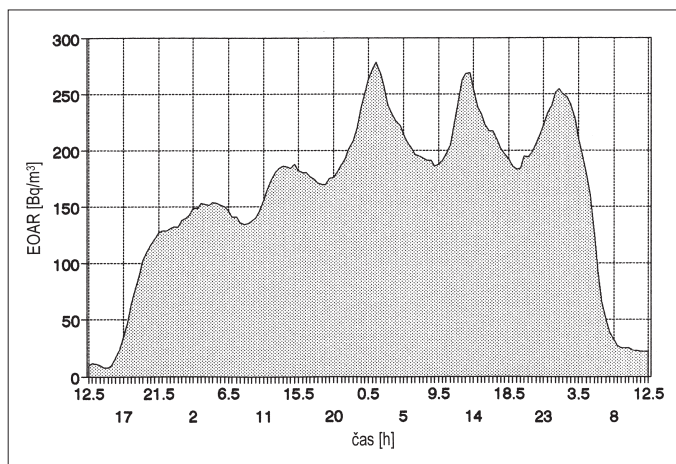
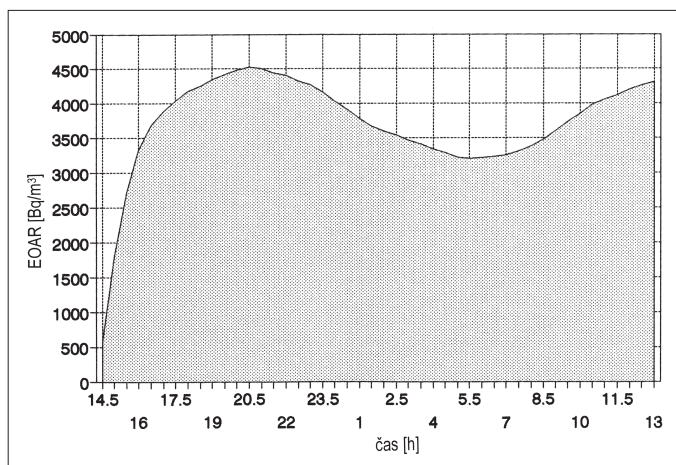
Je předpokládáno [11], že plyn radon do obestavěného prostoru proniká uvolňováním ze stavebního materiálu, z geologického podloží a z vody, již jsou byty zásobovány. Pokud se týká vody, je tento předpoklad správný. U stavebního materiálu a geologického podloží je třeba vyslovit námitky.

Studie, dokazující závislost ekvivalentní objemové aktivity radonu (EOAR) v bytech na hmotnostní aktivitě zdiva (příkonu fotonového dávkového ekvivalentu PFDE), jsem nenašel. V tomto článku je vztah EOAR a PFDE hodnocen na souboru dat z cca 250 obytných objektů města Jáchymova [12]. Podle tří kritérií, hodnotících „radonové riziko“, byly sestaveny tři soubory.

Prvý zahrnuje 39 objektů s nejvyššími hodnotami součtového kritéria $S_k = \text{EOAR}/200 + \text{PFDE}/2$. Průměry $\text{EOAR} = 2395 \pm 1047 \text{ Bq}/\text{m}^3$, $\text{PFDE} = 1,41$

¹⁾ Koeficient k (v české literatuře je většinou značen r) byl spočten podle vzorce

$$k = \frac{\sum (x_i y_i)}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}}, \text{ převzatého z monografie Reisenauer „Metody matematické statistiky“}.$$



Obr. 2 – Monitorování ekvivalentní objemové aktivity radonu EOAR po realizaci protiradonových ozdravných opatření

a) V prvním patře rodinného domku (okres Karlovy Vary) po odvětrání podlaží objektu. Před začátkem monitorování místnost důkladně vyvětrána, v místnostech v přízemí otevřena okna. (Horní obr.)

b) V nejvyšším patře školní budovy (okres Karlovy Vary) po instalaci větrání s rekuperací. Během pobytu žáků ve škole bylo větrání zapnuto. Monitorováno bylo o víkendu, při vypnutém větrání. (Dolní obr.)

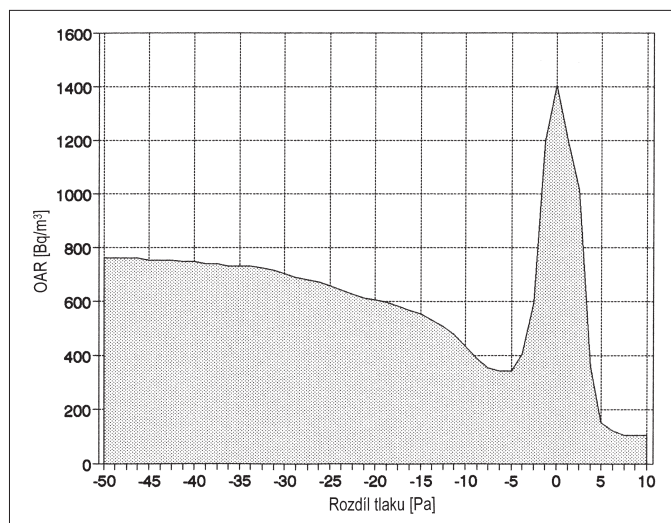
$\pm 2,89 \mu\text{S/h}$, výběrový koeficient korelace^{*)} $k = -0,13$. Ve druhém souboru je 38 objektů s nejvyššími hodnotami EOAR. Průměry EOAR = $2420 \pm 1050 \text{ Bq/m}^3$, PFDE = $1,17 \pm 2,56 \mu\text{S/h}$, $k = -0,07$. Třetí soubor sestává ze 31 objektů s nejvyššími hodnotami PFDE. Průměry EOAR = $1279 \pm 1177 \text{ Bq/m}^3$, PFDE = $2,80 \pm 3,19 \mu\text{S/h}$, $k = 0,07$. Ve všech případech je koeficient k blízký nule (pro $p^{**}) = 0,01$ je kritická hodnota 0,40 až 0,45). Významný příkon radonu do obestavěného prostoru ze zdvíja je problematický.

Koncepce protiradonových ozdravných opatření je založena na předpokladu, že radon do obestavěného prostoru proniká z geologického podlaží jako plyn [11]. I tento předpoklad je zpochybněn řadou kontrolních měření [13]. Ekvivalentní objemová aktivita radonu (EOAR) byla monitorována ve 37 objektech, v nichž již byla realizována ozdravná opatření. Bylo měřeno monitorem radonu 1NC94, vyvinutým v Nukleárním centru Univerzity Karlovy [14].

Příklad monitorování v rodinném domku s odvětrávaným podlažím (z celkem 21 proměřených objektů) je na obr. 2a. Monitorováno bylo v pokoji v prvním patře, v místnostech v přízemí byla otevřena okna. Před měřením byla místnost vyvětrána. EOAR strmě narůstá okamžitě po zapnutí přístroje, po šesti hodinách je rovna 4500 Bq/m^3 . Příklad monitorování v objektu s ventilací a rekuperací

*) Parametr p vyjadřuje interval spolehlivosti, $p = 0,01$ odpovídá 100 (1- p) %.

Hodnoty p pro různá n – počet měření, jsou převzaty z tabulek v citované monografii. Dům na Floridě byl postaven pro řešení radonového programu, ventilátory byly řízeny automaticky podle zadaných tlakových podmínek, tj. požadovaných rozdílů tlaku.



Obr. 3 – Monitorování OAR v „radonovém“ domě Florida University. Závislost OAR na podtlaku a přetlaku v proměřované místnosti.

(z celkem 16 proměřených objektů) je na obr. 2b. Monitorováno bylo v nejvyšším podlaží školní budovy. Místnosti o patro níže měly otevřená okna. Měřeno bylo během víkendu, od 12.30 v pátek do 12.30 h v pondělí. Okamžitě po automatickém vypnutí větrání EOAR strmě narůstá. V pondělí ráno bylo větrání automaticky zapnuto, EOAR prudce klesla z 250 na 20 Bq/m^3 . Oba objekty jsou v karlovarském okrese.

Stejně jako v případě na obr. 2a bylo měřeno v 11ti objektech obcí v příbramském okrese a v 10 objektech obce v karlovarském okrese. Průměrná hodnota EOAR podle roční integrální dozimetrie ze všech 21 objektů před odvětráním podlaží je $1229 \pm 532 \text{ Bq/m}^3$, podle krátkodobého monitorování po odvětrání podlaží je EOAR = $1236 \pm 997 \text{ Bq/m}^3$. Průměrné hodnoty jsou téměř identické, při krátkodobém monitorování je vyšší směrodatná odchylka. Jako problematická je účinnost odvětrání podlaží hodnocena i v zahraničí, například (15).

Nečekaný byl výsledek experimentu v „radonovém“ domě University of Florida [16]. Zvýšená OAR byla zjištěna při velkém podtlaku uvnitř domu, snížená při přetlaku (obr. 3). Nejvyšší hodnota OAR však byla naměřena při nulovém podtlaku.

Obtížně vysvětlitelné poznatky z kontrolních měření v objektech po odvětrání jejich podlaží a výsledky experimentu v práci (16) zpochybňují model přímého pronikání plynu radonu do obestavěného prostoru z geologického podlaží. Nové poznatky o přirozené dynamické složce atmogeochemického pole nabízejí i jiné možnosti.

Pozoruhodná je práce [17], shrnující výsledky desetiletého výzkumu pracovníků Colorado School of Mines. Modifikovanou atmogeochemickou metodou aktivní sorpce na kapalný sorbent byl monitorován obsah radionuklidů ve vzduchu v důlních dílech, domech, laboratořích a jeskyních. Alfaspktrometrií byly v sorbentu zjištěny anomální objemové aktivity mimo jiné ^{226}Ra předcházejícího v rozpadové řadě ^{222}Rn . Aktivita se měnila v rozmezí jednotek mBq/m^3 až desítek Bq/m^3 . Byla zjištěna variace obsahů radionuklidů ve vzduchu s časem a s místem. Výnos radionuklidů z geosféry do troposféry vysvětluje autoři hypotézou, vycházející z kvantové (vlnové) mechaniky. Podobným způsobem je interpretován i výnos neradioaktivních prvků z geosféry do atmosféry v práci [18].

Výnos radia ^{226}Ra z geosféry do troposféry, doložený v práci [17], umožňuje nový výklad hromadění radonu v bytech. Radon se uvolňuje z radia vynášeného z geosféry do troposféry. Radium obytným prostorem pouze prochází, z něho uvolňovaný plyn radon je v uzavřeném prostoru zachycen. OAR v obytném prostoru pak závisí na variacích výnosu ^{226}Ra a na intenzitě větrání. Tento výklad odstraňuje potíže při interpretaci výsledků kontrolních měření po odvětrání podlaží objektů [13], [15] a práce [16].

4. ZÁVĚR

Radon je běžnou všudypřítomnou součástí ovzduší. Lidskému zdraví je nebezpečný pouze při vysokých objemových aktivitách, jaké se vyskytují zejména ve špatně větraných baňských dílech, především při těžbě uranu. Současná monitorovací technika a systémy větrání umožňují toto nebezpečí zcela vyloučit.

Zvýšené OAR se mohou vyskytnout i v bytech, výjimečně jsou zjišťovány hodnoty až 10^4 Bq/m³. Ty jsou naměřeny pouze v málo obývaných, nevětraných místnostech. Mezní hodnoty OAR požadované pro nové (100 Bq/m³) a pro rekonstruované (200 Bq/m³) objekty, vycházejí z „teorie“ LNT. Platnost této „teorie“ není přesvědčivě doložena. Ve studii [5] je prokázána škodlivost absence OAR v rozmezí 0 až 250 Bq/m³.

Objemová aktivita radonu ²²²Rn v obytných prostorách nezávisí významně na radioaktivitě zdiva. Do objektů radon z geologického podloží neproniká jako plyn, spíše je uvolňován z částic radia ²²⁶Ra, pronikajícími do obestavěného prostoru doloženým, ale málo prozkoumaným mechanismem [17]. Radon je jeden z mnoha subtilních dynamických geofaktorů ovlivňujících životní prostředí, jeho vliv na lidské zdraví je třeba studovat komplexně.

Použitá literatura:

- [1] Deetjen P., Falkenbach A.: Radon und Gesundheit. *Peter Lang Verlag*, Berlin, Wien, 1999
- [2] Gruntorád J., Mazač O.: Impact of Subtle Dynamic Geofactors on Environment. *Acta Universitatis Carolinae Environmentalica* Vol. 8 (1994), Nos 1–2, Praha, 1995
- [3] Klener V. a kol.: Hygiena záření. *AVICENUM*, zdravotnické nakladatelství, Praha, 1987
- [4] Rockwell T., Drobník J.: Proč nízká úroveň záření nemůže způsobit rakovinu. *VESMÍR 77*, časopis AV ČR, říjen 1998
- [5] Cohen B. L.: Validity of the Linear-No Threshold Theory of Radiation Carcinogenesis in the Low Dose Region. In *Radon and Health*, *Peter Lang GmbH Europäischer Verlag der Wissenschaften*, Frankfurt am Main, 1999
- [6] Feinendegen L. E., Bond V. P., Sondhaus C. A.: Low-Dose Irradiation Appears to Reduce Endogenous DNA Damage. In *Radon and Health*, *Peter Lang GmbH Europäischer Verlag der Wissenschaften*, Frankfurt am Main, 1999
- [7] Kunz, E. et al.: First Results of an Epidemiological Study of Lung Cancer Incidence in Inhabitants of a Central Bohemia Pluton Area. *Abstracts, Days of Radiation Hygiene*, Jáchymov, 1996
- [8] Tomášek L. et al.: Czech residential radon study. National Radiation Protection Institute, Czech Republic, *International Congress Series 1225*, 2002
- [9] Kotulán J.: Zdraví a životní prostředí. *AVICENUM*, zdravotnické nakladatelství, Praha, 1991
- [10] Spurný Z.: Atmosférická ionizace. Cesta k vědění, *Academia*, Praha, 1985
- [11] Environmental Protection Agency: Radon Reduction Techniques for Detached Houses. *Technical Guidance*. USA, EPA 1987
- [12] Protiradonová ozdravná opatření. IRÚP Karlovy Vary, *Archiv Městského úřadu Jáchymov*, 1993
- [13] Gruntorád J.: Vztah variací atmochemického pole k radonové metronomii. Uhlí, Rudy, *Geologický průzkum*, No. 8, 1996
- [14] Krejčík S.: Radon Daughters Monitor TS 96. *Charles University Prague, Nuclear Centre*, Praha, 1996
- [15] Rydock J. P., Naess-Rolstad A., Brunsell J. T.: Effectiveness of Radon Mitigation Measures in 12 Houses 10 Years after Implementation. *Indoor Built Environment. International Society of the Built Environment*, January-February 2002
- [16] Hintenlang D. E., Al-Ahmady K.: Pressure Differentials for Radon Entry Coupled to Periodic Atmospheric Variations. *Indoor Air 2*, Munksgaard, DK-Copenhagen, 1992
- [17] Holub R. F., Reimer G. M., Honeyman B. D., Smrz P. K.: Measurement and preliminary behavioral model of radioactive „geoaerosols“. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 249, No. 1, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001
- [18] Krčmář B., Vylita T.: Unfilterable „geoaerosols“, their use in the search for thermal, mineral and mineralised waters. *Environmental geology*, Vol. 40, No. 6, 2001

Poznámka recenzenta:

V ovzduší se vyskytuje téměř vždy určité množství plynného radonu. Je známa příčinná souvislost mezi výskytem radonu v ovzduší a poškozením zdraví a má se zato, že tento

vztah je lineární, bezprahový. Na člověka negativně působí ionizující záření, uvolňované při rozpadu radonu. Proto jsou pro vnitřní prostředí budov legislativně dány jeho přípustné limitní hodnoty.

Považuje se za prokázané, že radon vniká do budov hlavně z podloží budovy, z vody a ze stavebního materiálu. Proto je tzv. radonové riziko ověřováno měřením jak u nových, tak u starých budov i na stavebních pozemcích a uvolňování radonu je sledováno u stavebních materiálů. Při překročení limitních hodnot se stavby chrání nákladnými protiradonovými opatřeními, spočívajícími hlavně v důkladném odvětrání a izolaci podloží domu, příp. v instalaci intenzivního nuceného větrání se zpětným získáváním tepla či v jiných technických opatřeních (izolační nátěry aj.).

Znám případy, kdy po protiradonových opatřeních nebyl měřením zjištěn jejich efekt. To se dosud vysvětlovalo nedokonalým provedením práce.

Pokud by platila teorie vyslovená autorem, totiž že příčinou radonu v uzavřeném prostředí je radium, které tímto prostředím prochází (ale jak, vždyť radium je pevná látka, snad jako prach?), veškerá dosud prováděná opatření by byla zbytečná. Také hypotéza o protektivním (ochranném) účinku malých dávek ionizujícího záření se zdá být diskutabilní.

Ale pokrok se rodí i z diskuse (a tu uvítáme), dopřejme proto autorovi prostor k vyslovení nových, ale velmi odvážných hypotéz. Zcela je zavrhnout nebo potvrdit může jen další výzkum, případně kvalifikovaný výklad současných znalostí.

Na čem se autor článku i zastánci teorie o průniku radonu do interiérů z podloží stavby shodují, je potřeba důkladného (intenzivního) větrání budov, určených k bydlení a pobytu lidí.

A. Lajčíková