

## RADONOVÝ INDEX GEOLOGICKÉHO PODLOŽÍ A JEHO VLIV NA STRATEGII VYHLEDÁVÁNÍ RIZIKOVÝCH OBJEKTŮ V ČESKÉ REPUBLICE

### Radon index of bedrock and its influence on strategy of detection of radon risk dwellings in the Czech Republic

IVAN BARNET<sup>1</sup> – IVANA FOJTÍKOVÁ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1

<sup>2</sup> Státní ústav radiační ochrany, Šrobárova 48, 100 00 Praha 10

**Key words:** radon risk maps, indoor radon, prognosis, GIS analysis, Czech Republic

**Abstract:** The comparison of geologically defined radon index at general (1 : 500 000) and detailed (1 : 50 000) scales with geometric means of indoor radon concentrations in municipalities has outlined the possible approaches of detection of houses exceeding the action level 400 Bq . m<sup>-3</sup> in the Czech Republic. Test of different methods has confirmed the prognostic power of geologically based radon risk maps. At present the method based on GIS analysis of centroids of municipalities and underlying rock type seems to be most efficient for the Radon Programme strategy at a general scale. However the newly designed approach will be oriented to GIS based geostatistical characterisation of intravilans of municipalities combining the soil gas and indoor radon datasets.

Hlavním cílem Radonového programu České republiky je vyhledání objektů překračujících směrnou hodnotu objemové aktivity radonu <sup>222</sup>Rn (dále OAR) 400 Bq . m<sup>-3</sup>, jejich následné ozdravení a tím i snížení expozice obyvatelstva ozáření z přírodních radionuklidů. Vzhledem k velké hustotě obyvatelstva a plošnému rozsahu území s vysokým indexem radonového rizika je nutno zvolit co nejefektivnější metodu distribuce stopových detektorů do obcí a objektů v měřítku celé ČR. V současnosti není zatím ani v evropském měřítku vyřešena optimální metoda vyhledávání objektů v jednotlivých územních celcích. Trend směřuje k využití geologických podkladů a jejich následné kombinaci s dosud pořízenými daty OAR v objektech (BARNET 2004, BARNET et al. 2005, BUSCH et al. 2004, KEMSKI et al. 2001, MILES a APPLETON 2005, PACHEROVÁ et al. 2005, STRZELECKI et al. 2004), případně geostatistického zpracování dat OAR na základě modelování (FRIEDMANN 2000, KANEVSKI a MAIGNAN 2004).

V současnosti jsou v České republice dokončeny v digitální vektorové formě dva ucelené systémy map radonového indexu geologického podloží v měřítku 1 : 500 000 (sine 1998) a 1 : 50 000 (BARNET et al. 2005), pokrývající jednotnou metodikou (NEZNAL et al. 2004) území České republiky. Oba systémy byly komparativně použity pro zatřídění obcí podle podložního radonového indexu a nastínění budoucí strategie vyhledávání.

### Metoda a výsledky

Zatřídění je výsledkem GIS analýzy (ArcView 9.1) souboru centroidů obcí (údaje Českého statistického úřadu ze sčítání lidu 2001) doplněnými o geometrické průměry měření radonu v objektech jednotlivých obcí (Radonový program ČR, Státní ústav radiační ochrany SÚRO – FOJTÍKOVÁ 2005) a map radonového indexu geologického podloží obou měřítek zpracovaných Českou geologickou službou.

V generalizované mapě 1 : 500 000 není díky měřítku rozlišena detailní litologie hornin, zejména je v ní potlačen plošný rozsah kvartérních sedimentů. Vzhledem k jejich nehomogenitě a obtížné charakteristice zdrojového materiálu jsou kvartérní sedimenty označovány přechodnou kategorií radonového indexu. To však nemusí být na závadu, pokud hodnotíme celé obce z hlediska předpokládaného přísnusu radonu z podloží do objektů v nich situovaných. Naproti tomu v detailnějších mapách měřítka 1 : 50 000 jsou tělesa kvartérních sedimentů dokumentována v plném rozsahu. Při analýze je nutno rovněž uvážit historicko-geografický fakt, že většina zástavby obcí je soustředěna v blízkosti vodotečí.

Lokální geologická tělesa však nemusí být automaticky určujícím zdrojem radonu, např. u propustných hornin, v jejichž podloží se nacházejí horniny s vyšší objemovou aktivitou radonu (NEZNAL MATĚJ a NEZNAL MARTIN 2005).

Analýza lokalizace centroidů obcí na mapách radonového indexu obou měřítek přináší zajímavé výsledky, vyjádřené v tab. 1 a 2 a jím odpovídajících obr. 1 a 2.

Pokud použijeme pro lokalizaci centroidů obcí generalizované mapy radonového indexu v měřítku 1 : 500 000, získáme celkem rovnoměrné rozdělení obcí podle radonového indexu podloží. Počty obyvatel vystavených radonu v dané kategorii radonového indexu odpovídají sčítání lidu z r. 2001 (údaje ČSÚ). Je však nutné si uvědomit, že maximální počty obyvatel v jednotlivých obcích reprezentují situování centroidů hlavního města a některých krajských měst na kategorii přechodného indexu.

Výrazně odlišné výsledky přináší analýza lokalizace centroidů obcí na podkladě map radonového indexu podloží v měřítku 1 : 50 000 (tab. 2. a obr. 2). Při použití detailních map je patrná převaha lokalizace centroidů a tím i odpovídá-

jící rozdelení obcí do kategorie přechodného indexu na úkor nízkého a středního indexu, což odpovídá i výše zmíněnému historicko-geografickému situování center obcí.

Na druhé straně je nutno si uvědomit, že hlubší podloží daného bodu – centroidu – na přechodném indexu (kvartérních sedimentech) může být tvořeno horninami s vysokými hodnotami OAR a že určující pro pronikání radonu do objektů jsou více podložní horniny a méně pokryvné útvary.

K ověření tohoto tvrzení byly ze souboru obcí vybrány podle map 1 : 50 000 ty obce na přechodném riziku, v jejichž podloží se ve vzdálenosti do 100 m od centroidu vyskytuje vysoký radonový index geologického podloží. Stometrová vzdálenost byla zvolena na základě převládajících hodnot šířek údolních niv a ostatních kvartérních sedimentů na vodotečích v oblasti středočeského plutonu a nahrazuje tak chybějící třetí prostorový rozměr map – mocnost kvartérního pokryvu. Těchto obcí bylo na území ČR vybráno celkem 128 a jsou soustředěny na Benešovsku, Písecku, Příbramsku a Strakonicu (podloží tvoří středočeský pluton) a Jihlavsku a Třebíčsku (podloží tvoří třebíčský syenitový masiv). Ač se tedy jedná o obce na přechodném riziku, v řadě z těchto obcí přesahuje geometrický průměr OAR v objektech hodnotu  $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  a v několika obcích hodnotu  $900 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Nemusí se však vždy jednat pouze o relativně málo mocný kvartérní pokryv, který může ovlivnit výsledné hodnoty radonu v objektech. Například v mirovickém metamorfovaném ostrovu (metabazity a kontaktně metamorfované proterozoické a spodnopaleozoické sedimenty na hlubším podloží granitoidů středočeského plutonu) byly zjištěny obce, jejichž geometrický průměr OAR se pohybuje mezi  $400\text{--}650 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , i když jsou podle lokalizace centroidů v generalizovaných i detailních mapách situovány do podloží s nízkým a středním radonovým indexem, čemuž odpovídají i hodnoty radonu v podložních horninách.

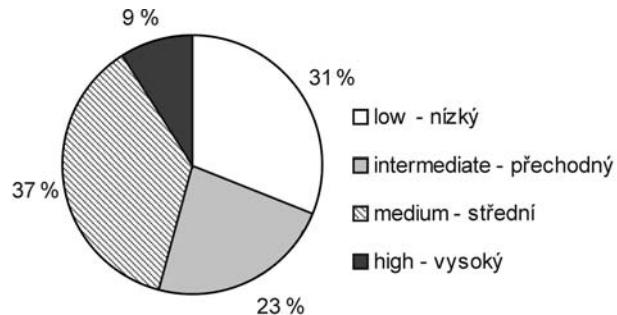
### Diskuse – využití výsledků GIS analýzy pro predikci radonu v obcích

V dalším pokračování radonového programu jde především o to stanovit rozumné kritérium pro výběr proměřovaných obcí tak, aby podíl domů s vyššími hodnotami OAR byl v obci, která bude z měření vyřazena, pokud možno co nejnižší, případně aby bylo možné jej co nejlépe odhadnout. To vyžaduje najít na základě geologie takovou trídící charakteristiku obcí, která by umožnila oddělit co nejpřesněji ty obce, ve kterých je výskyt objektů s vyššími hodnotami OAR málo pravděpodobný. Toto tvrzení bylo v další práci potvrzeno analýzou dat získaných z celé republiky. Vliv podložních hornin na OAR v objektech byl potvrzen již dříve (BARNET 2004). Obrázek 3 ilustruje závislost geometrických průměrů OAR v měřených obcích na radonovém indexu podložních hornin v okolí středočeského plutonu.

Zvolený přístup (analýza indexu obce z mapy měřítka 1 : 500 000) byl použit ke zjištění vztahu mezi zastoupením domů s určitou hodnotou OAR a převažující kategorií radonového indexu podloží obcí. Pomocí GIS analýzy byl

Tabulka 1. Distribuce podložního radonového indexu centroidů obcí podle analýzy map radonového indexu 1 : 500 000

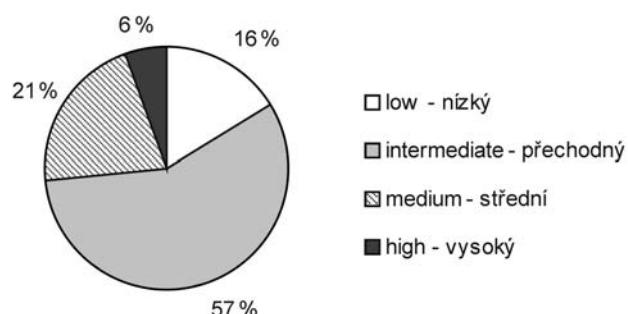
obce podle radonového indexu 1 : 500 000			
Rn index	počet	obyvatel 2001	max. obyvatel
nízký	1 998	2 064 192	96 552
přechodný	1 471	5 372 908	1 180 131
střední	2 351	2 177 411	71 848
vysoký	576	680 806	99 909
celkem	6 396		



Obr. 1. Distribuce podložního radonového indexu centroidů obcí podle analýzy map radonového indexu 1 : 500 000.

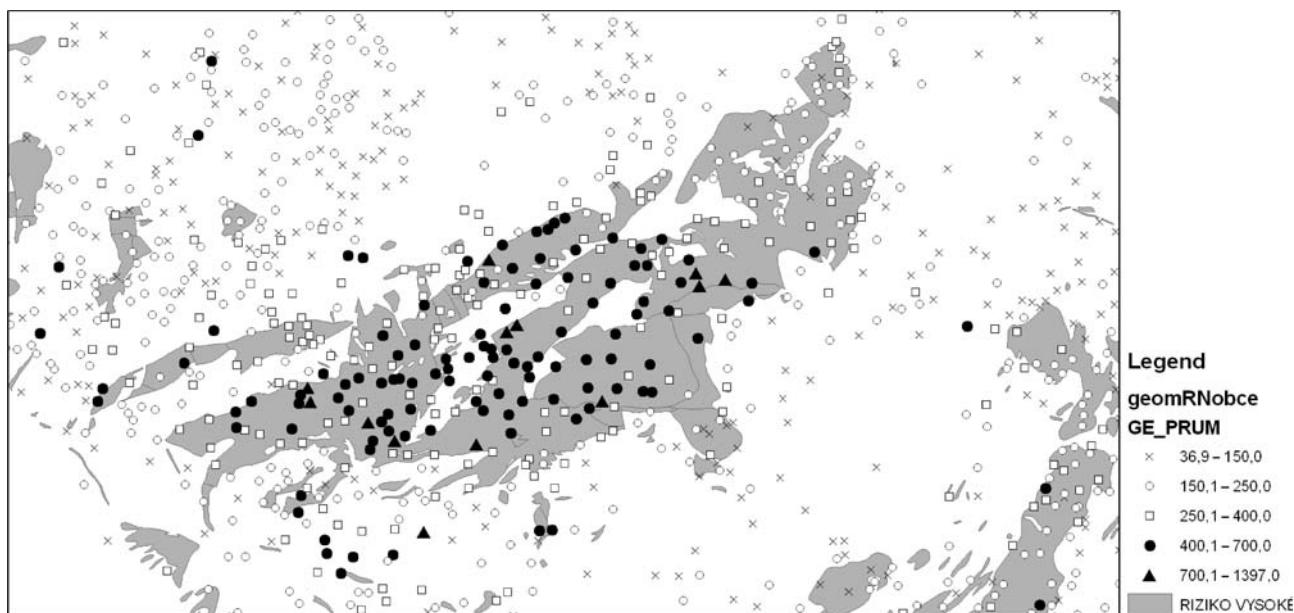
Tabulka 2. Distribuce podložního radonového indexu centroidů obcí podle analýzy map radonového indexu 1 : 50 000

obce podle radonového indexu 1 : 50 000			
Rn index	počet	obyvatel 2001	max. obyvatel
nízký	1 055	1 029 304	103 299
přechodný	3 642	7 042 111	1 180 131
střední	1 341	1 658 386	379 743
vysoký	358	565 516	99 909
celkem	6 396		

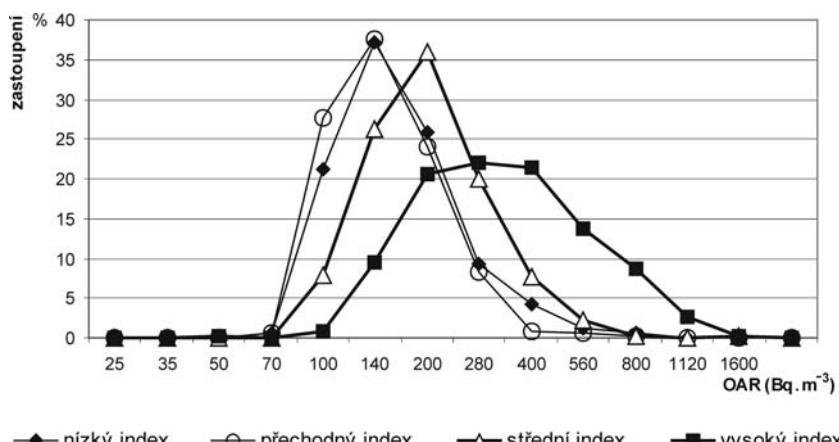


Obr. 2. Distribuce podložního radonového indexu centroidů obcí podle analýzy map radonového indexu 1 : 50 000.

každé dostatečně proměřené obci v ČR (alespoň 20 % objektů v obci a současně minimálně 20 změřených objektů) přiřazen radonový index centroidu obce. Takových obcí bylo v databázi SÚRO nalezeno 1627, přitom všechny typy byly dostatečně zastoupeny: 353 obcí s nízkým indexem, 336 s přechodným, 602 se středním a 336 s vysokým. Na obr. 4 je znázorněn geometrický průměr OAR v obcích



Obr. 3. Výřez z mapy geometrických průměrů OAR obcí v širším okolí středočeského plutonu. Horniny vysokého indexu podloží jsou znázorněny podle GEOCR500 (sine 1998), geometrické průměry OAR v obcích jsou uvedeny v  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ .



Obr. 4. Distribuce geometrických průměrů OAR v obcích podle kategorie radonového indexu geologického podloží.

podle geologické predikce z mapy radonového indexu 1 : 500 000.

Zatímco distribuce geometrických průměrů v obcích, jejichž centroid je situován na geologické podloží označené nízkou, střední a vysokou kategorií radonového indexu jsou zřetelně odlišeny, distribuce OAR v kategorii přechodného indexu je blízká kategorii nízkého indexu. Přechodný index je v radonových mapách použit pro nehomogenní kvartérní sedimenty fluviálního, glacifluviálního nebo eolického původu. Rozdíly mezi plochami měření radonu klasifikované přechodným a nízkým indexem jsou patrné z tab. 3 (zpracování podle radonové databáze ČGS). Přechodný index reprezentuje aluvia, spráše, glacifluviální sedimenty a říční terasy. Nízký index odpovídá amfibolitům, křídovým, paleogénním a neogénním sedimentům a proterozoickým metasedimentům.

Průměr radonového indexu je u obou skupin hornin velmi blízký, ale skupiny se výrazně liší propustností a zastoupením jílovitého pokryvu. Propustnost je v databázi

ČGS klasifikována třemi stupni: 1 – nízká, 2 – střední, 3 – vysoká, pokryv je stanoven podle geologické situace na místě pokryvu. Oba zmíněné parametry indikují nižší propustnost u skupiny hornin přechodného indexu, i když průměrná objemová aktivita radonu v podloží je u skupiny hornin přechodného indexu vyšší. Koincidenci distribucí OAR v obcích situovaných na kategorii nízkého a přechodného indexu lze proto vysvětlit následovně.

Podložní horniny klasifikované přechodným indexem mají sice vyšší objemovou aktivitu radonu, ale radon díky nižší propustnosti a přítomnosti jílovitého pokryvu méně proniká do objektů.

Pochopitelně to neplatí pro všechny ostatní typy pokryvu na horninách přechodného indexu.

Pro distribuci stopových detektorů do jednotlivých obcí se jeví účelným i podrobnější geologická znalost horninového podloží. Z obrázku 5 je patrné, že i v obcích na vysokém indexu podloží existují diferenze v distribuci OAR, dané petrologií podložních hornin.

Zatímco podloží durbachitů (19) a granodioritů (18) výrazně posunuje distribuci OAR směrem k vyšším hodnotám, granite (20) jsou charakterizovány nižšími hodnotami OAR. Nejnižší hodnoty OAR byly ve vysoké kategorii radonového rizika zaznamenány v assyntských granitoidech (lužický a brněnský pluton). V generalizované mapě radonového indexu v měřítku 1 : 500 000 sestavované do r. 1998 (sine. 1998) byly tyto horniny pro menší počet do té doby provedených měření radonu v podloží zařazeny preventivně do kategorie vysokého indexu, avšak na základě detailních map v měřítku 1 : 50 000 zpracovaných v období 1999–2006 jsou již řazeny do kategorie středního indexu.

## Závěry

Alternativní návrhy na pokračování vyhledávacího programu objektů překračujících směrnou hodnotu  $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  radonu lze shrnout do tří postupů:

1. Jako kritérium pro třídění obcí nadále používat radonový index, ukončit měření obcí na jiné než vysoké kategorie radonového indexu a nabídnout obcím s vysokým indexem doměření tak, aby v každé z nich bylo dokončeno měření alespoň ve 30 % domů. Nevýhodou tohoto postupu je orientační vazba centroidu obce na určitý index podloží v generalizovaném měřítku a přiřazení indexu podloží celé obci.
2. Jako třídicí kritérium použít konkrétní typ horniny v podloží obce, ukončit měření obcí na horninách, kde je nízká pravděpodobnost naměřit vysoké hodnoty v objektech a nabídnout obcím na vytipovaném podloží doměření všech objektů v obci, případně na základě geologických znalostí vytipovat užší podsoubor obcí v kategorii vysokého indexu podle detailních geologických charakteristik podloží. Pokud by se jednalo pouze o obce na granodioritech a durbachitech (centroidy podle map 1 : 500 000), je jich v České republice 315 a dosud nezměřených objektů v nich 53 455.

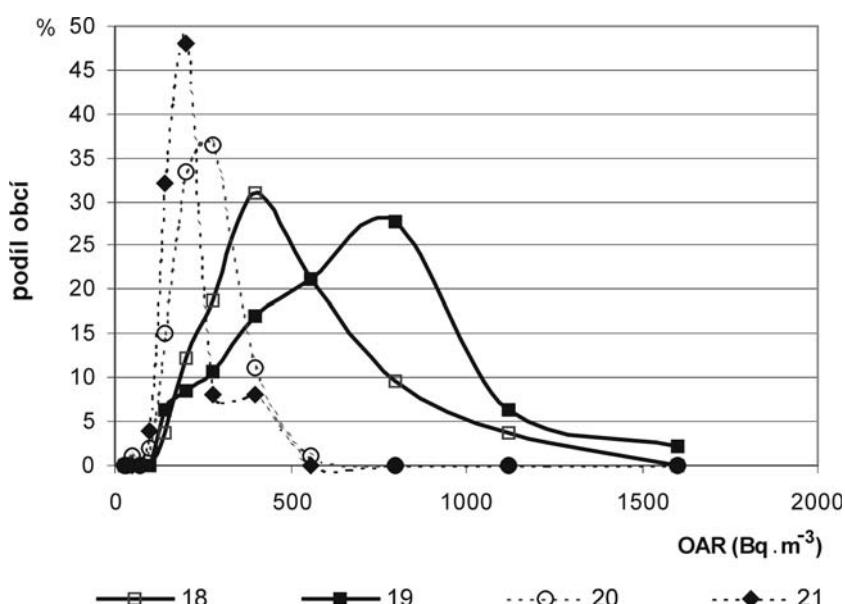
3. Dosud neaplikovaným postupem je využití detailních map radonového indexu podloží 1 : 50 000 a databáze změřených objektů a charakterizování zástavby obce (nikoliv hypotetický centroid) kritériem kombinujícím vliv geologické situace v intravilánu obce a dosud získaných výsledků OAR v objektech. Nově pořízená data – topomapy 1 : 25 000 na bázi vektorizovaných dat letecké kartografie umožňují v kombinaci s mapami radonového indexu 1 : 50 000 a daty OAR v objektech přesně specifikovat části zástavby obcí situované na radonově rizikových horninách (až do úrovně jednotlivých objektů).

Ze současného hlediska efektivity vyhledávání rizikových objektů se jeví vhodnější využití druhého postupu se zaměřením na rozdíly v jednotlivých horninových typech. Je pochopitelné, že v takto vytvářených souborech nelze zohlednit technicko-stavební stav jednotlivých objektů, který má na pronikání radonu z podloží významný vliv.

Z perspektivního hlediska (třetí postup) lze topologickou analýzou s využitím moderních geostatistických metod, všech dostupných geologických dat OAR v podloží a dat OAR v objektech vyčlenit v intravilánu obce skupiny objektů s vyšší pravděpodobností překročení směrné hodnoty objemové aktivity radonu  $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ . Na tento postup,

Tabulka 3. Rozdíly v propustnosti, radonovém indexu, typu pokryvu a OAR v podloží mezi horninami klasifikovanými přechodným a nízkým indexem

	průměrný index	průměr propustnosti	% jílovitého pokryvu	průměr Rn ( $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ )	počet
přechodný index	1,56	1,67	44,1	24,7	1188
nízký index	1,51	2,26	28,9	19,8	3894



Obr. 5. Distribuce OAR v obcích na vysokém radonovém indexu podloží. 18 – granodiority až diority, 19 – durbachity, syenites, 20 – granites, 21 – assyské granitoids.

respektující i trendy při přípravě evropské mapy radioaktivity a radonu, bude v budoucnu orientována část dalšího výzkumu v oboru radonového rizika podloží.

## Literatura

- BARNET, I. (2004): Indoor radon related to uranium in granitoids of the Central Bohemia plutonic complex. – 4th European Conference on Protection against Radon at Home and at Work. – Czech Techn. Univ. Prague.
- BARNET, I. – MIKŠOVÁ, J. – FOJTKOVÁ, I. (2005): Indoor-soil gas relationship in the Central Bohemian Plutonic Complex. – Annals Geophysics, 48, 1, 93–99.
- BARNET, I. – PACHEROVÁ, P. – MIKŠOVÁ, J. – KARENKOVÁ, J. – TOMAS, R. (2005): Mapy radonového indexu geologického podloží 1 : 50 000. – CD-ROM. Čes. geol. služba. Praha.
- BUSCH, H. – PREUSSE, W. – SPERRHACKE, A. (2004): Radon in dwellings in the southeast Saxon district of Löbau-Zittau. In: BARNET, I. – NEZNAL, M. – PACHEROVÁ, P.: Radon investigations in the Czech Republic X and the seventh international workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping, 27–36. – Čes. geol. služba. Praha.
- FOJTKOVÁ, I. (2005): Použití geologických podkladů pro třídění obcí podle pravděpodobnosti výskytu vyšších hodnot OAR v objektech, důsledky pro další řízení Radonového programu ČR. Příloha 1.2. in Zpráva o plnění Radonového Programu ČR. – MS St. úst. rad. objektů.
- FRIEDMANN, H. (2000): Radon in Austria. In: BARNET, I. – NEZNAL, M.: Radon investigations in the Czech Republic VIII and the fifth international workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping, 79–85. – Čes. geol. služba. Praha.
- KANEVSKI, M. – MAIGNAN, M. (2004): Analysis and Modelling of Spatial Environmental Data. – 288 p., EPFL Press, Lausanne.

- KEMSKI, J. et al. (2001): Ermittlung einer Transferfunktion für die Radonkonzentration in der Bodenluft und der Wohnraumluft incl. Radonmessungen in Häusern zur Validierung des geologisch induzierten Radonpotenzials. – 206 p. Universität Bonn.
- MILES, J. C. H. – APPLETON, J. D. (2005): Mapping variation in radon potential both between and within geological units. – *J. Radiol. Prot.*, 25, 257–276. doi:10.1088/0952-4746/25/3/003.
- NEZNAL, MATĚJ – NEZNAL, MARTIN – MATOLÍN, M. – BARNET, I. – MIKŠOVÁ, J. (2004): The new method for assessing the radon risk of building sites. – *Czech. Geol. Surv. Spec. Pap.*, 47. p.
- NEZNAL, MATĚJ – NEZNAL, MARTIN (2005): Permeability as an important parameter for radon risk classification of foundation soils. – *Ann. Geophys.*, 48, 1, 175–180.
- PACHEROVÁ, P. – BARNET, I. – FORTÍKOVÁ, I. (2005): Korelace koncentrací radonu v podloží a v objektech na území bývalých okresů Domažlice a Prachatice. Indoor and soil gas radon relationship in Domažlice district and Prachatice district. – *Zpr. geol. Výzk. v Roce 2004*, 124–126.
- STRZELECKI, R. – WOŁKOWICZ, S. – NAŁĘCZ, T. (2004): Pierwiastki Promieniotwórcze a problem zagrożeń radioekologicznych w miastach regionu Sudeckiego. – Report PGS, Warszawa.
- sine (1998): Atlas map České republiky GEOČR 500. – CD-ROM. Čes. geol. služba. Praha.