

VYSOKOŠKOLSKÉ SKRIPTÁ

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
Prírodovedecká fakulta
Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky

Andrej MOJZEŠ

METODIKA TERÉNNYCH GEOFYZIKÁLNYCH MERANÍ RÁDIOAKTIVITY HORNÍN



2012

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE

Predkladané vysokoškolské skriptá sú určené pre študentov bakalárskeho štúdia študijného odboru 4.1.23 Geológia na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave so zameraním na Aplikovanú a environmentálnu geofyziku ako učebné texty k predmetu rovnakého názvu.

© RNDr. Andrej Mojzeš, PhD., 2012

Recenzoval: Doc. RNDr. Jozef Lanc, CSc.

Za odbornú stránku týchto vysokoškolských skript zodpovedá autor.

ISBN 978-80-223-3203-3

OBSAH

Úvod	5
1. Rádionuklidové metódy v geológii	6
2. Rádiometrické metódy prieskumu	10
2.1. Voľba metód prieskumu	11
2.1.1. Základné úvahy pri plánovaní prieskumu	12
2.1.2. Vzťah medzi leteckými a povrchovými meraniami	14
2.2. Rádiometrické gama metódy	15
2.2.1. Základy gama metód	15
2.2.1.1. Terestriálne gama žiarenie	15
2.2.1.2. Gama žiarenie pozadia (background)	17
2.2.1.2.1. Kozmické žiarenie	17
2.2.1.2.2. Rozpadové produkty ^{222}Rn v atmosfére	18
2.2.1.2.3. Rádioaktívne kontaminanty	19
2.2.1.2.4. Prírodné rádionuklidy akumulované a premiestnené činnosťou človeka	21
2.2.1.2.5. Meranie gama žiarenia pozadia	21
2.2.1.3. Fyzikálne základy gama žiarenia	22
2.2.1.4. Štruktúra meraného poľa gama žiarenia	28
2.2.1.5. Hĺbkový dosah gama metód	30
2.2.1.6. Spôsoby merania gama žiarenia pri prieskume	32
2.2.1.6.1. Meranie celkovej gama aktivity	32
2.2.1.6.2. Meranie gamaspektrometrické	36
2.2.1.7. Rušivé vplyvy pri gama prieskume	38
2.2.2. Letecký gama prieskum (aerogamaprieskum)	44
2.2.2.1. Letecké meranie celkovej gama aktivity	50
2.2.2.2. Letecké gamaspektrometrické meranie	54
2.2.3. Automobilový gama prieskum (autogamaprieskum)	61
2.2.3.1. Automobilové gamaspektrometrické meranie	61
2.2.4. Peší gama prieskum	65
2.2.4.1. Meranie celkovej gama aktivity prenosnými rádiometrami	67
2.2.4.2. Meranie pešej gamaspektrometrie prenosnými gamaspektrometrami	69

2.2.4.3. Povrchové premeriavanie horského reliéfu (PPHR)	76
2.2.5. Hĺbkový gama prieskum	76
2.2.6. Rádiometrické vzorkovanie	78
2.2.7. Meranie rádioaktivity morského (jazerného) dna	80
2.3. Rádiometrické alfa metódy	82
2.3.1. Fyzikálne základy alfa žiarenia	83
2.3.2. Chemické a fyzikálne vlastnosti radónu, jeho pôvod a transport	85
2.3.3. Spôsoby merania radónu v pôdnom vzduchu	92
2.3.3.1. Meranie emanácií prenosnými emanometrami	92
2.3.3.2. Expozičné emanačné metódy	101
Literatúra	106
Zoznam obrázkov	108
Zoznam tabuliek	111

ÚVOD

Prírodné rádioaktívne prostredie je hlavným zdrojom ožiarenia človeka, či už vo vnútornej alebo vonkajšej forme. Najvýznamnejšími zdrojmi vnútorného ožiarenia sú rádioaktívne prvky ^{40}K a ^{222}Rn , ktoré sa dostali do tela človeka. Zdrojom vonkajšieho ožiarenia je kozmické žiarenie, prírodné rádioaktívne izotopy ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U a ^{232}Th , ako aj dcérske produkty ich rozpadových radov, vyskytujúce sa v horninách, vodách, stavebných materiáloch a vzduchu. Veľkosť vnútorného aj vonkajšieho ožiarenia sa mení v závislosti od geologickej stavby, typu obydla a nadmorskej výšky (IAEA-TECDOC-566, 1990).

Pretože prírodná rádioaktivita predstavuje minimálnu základnú veľkosť dosiahnuteľného ožiarenia, s touto hodnotou sa porovnáva veľkosť ožiarenia získaného z umelých zdrojov rádioaktivity, ako je medicínske röntgenové žiarenie, rádioaktívny spád z výbuchov jadrových zbraní a vplyvy jadrových elektrární. Preto poznanie úrovne prírodnej rádioaktivity celosvetovo má rozhodujúci význam.

Štúdium rádioaktivity prírodného prostredia je intenzívne vykonávané už od samých začiatkov objavu rádioaktivity (1896). Rozvoj prieskumných metód nasledoval veľmi rýchlo po pokrokoch vo vývoji prístrojového vybavenia v 20. rokoch 20. storočia. Postupne sa vyvíjajúci komplex prieskumných metód rádioaktivity horninového prostredia sa stával základnou bázou na vyhľadávanie ložísk uránu, ale aj ďalších rádioaktívnych a nerádioaktívnych mineralizácií, geologické mapovanie, vyhľadávanie miest so zvýšenou rádioaktivitou a časom aj kvantitatívne stanovovanie identifikovanej aj neidentifikovanej mineralizácie (IAEA-TRS-174, 1976). Hoci doteraz drvivá väčšina z nameraných údajov o rádioaktivite prírodného prostredia pochádza z prieskumov pre účely vyhľadávania uránovej a inej mineralizácie a geologického mapovania, môžu byť tieto použité na informáciu o veľkosti rádioaktivity prírodného geologického pozadia.

1. RÁDIONUKLIDOVÉ METÓDY V GEOLÓGII

(podľa Mareš et al., 1990)

Na meranie rádioaktivity pre geologické účely sa využíva množstvo metód označovaných súhrnne ako **rádionuklidové metódy**. Definujú sa ako metódy, ktoré využívajú *premeny jadier atómov, jadrové žiarenie a pôsobenie jadrového žiarenia na hmotu*.

Podľa spôsobu vzniku registrovaného jadrového žiarenia sa rádionuklidové metódy delia na:

- A) **metódy merania prírodnej rádioaktivity = radiometrické metódy**. Sú to pasívne metódy, ktorými sa *kvalitatívne a kvantitatívne stanovuje prítomnosť prírodných i umelých rádioaktívnych prvkov v horninách, vodách a vzduchu* (tab. 1).
- B) **metódy merania vybudených polí jadrového žiarenia = metódy jadrovej geofyziky**. Sú to aktívne metódy, ktoré využívajú *pôsobenie zdrojov jadrového žiarenia na skúmané geologické objekty a umožňujú stanovenie obsahov ako rádioaktívnych, tak i nerádioaktívnych prvkov a fyzikálnych vlastností hornín*.

Tieto sa ďalej delia na:

- **metódy interakcie žiarenia zdroja so skúmaným objektom**, ktoré registrujú zmeny zdrojového žiarenia po jeho interakcii s objektom (tab. 2)
- **aktivačné metódy**, ktoré sú založené na meraní rádioaktivity rádionuklidov vzniknutých v analyzovanom materiáli po jeho ožiarení jadrovým žiarením (tab. 3).

Podľa fyzikálneho druhu registrovaného jadrového žiarenia sa rádionuklidové metódy delia na:

- **metódy alfa**,
- **metódy beta**,
- **metódy gama**,
- **metódy neutrónové**.

Podľa spôsobu merania jadrového žiarenia sa rádionuklidové metódy delia na:

- **merania celkovej (úhrnnej) aktivity**,
- **spektrometrické merania**.

Podľa podmienok merania sa rádionuklidové metódy delia na:

- **metódy terénne** (letecké, automobilové, pešie, vrtné, banské a merania na morskom/jazernom dne),
- **metódy laboratórne**.

Tab. 1 Prehľad metód merania prírodnej rádioaktivity a ich použitie v geológii (Mareš et al., 1990)

Metóda	Podmienky	Použitie, fyzikálny parameter, prvok (hranica stanoviteľnosti)
celková alfa aktivita	L	Ra v horninách ($10^{-12} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), Ra vo vodách ($1,85 \cdot 10^{-2} \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$)
emanometria	L, P	^{222}Rn ($1 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$), ^{220}Rn , mapovanie, eU (ppm), eTh (ppm)
alfaspektrometria	L	kvalitatívne a kvantitatívne stanovenie členov prirodzených rozpadových radov, rádioaktívna rovnováha, emanovanie hornín
žiarenie beta	L	celková beta aktivita hornín (ppm eU)
beta - gama	L	U, Ra, Th (1 – 20 ppm eU)
celková gama aktivita	L P	U+Th+K v horninách (0,1 ppm eU) U+Th+K v horninách (ppm eU), mapovanie, vyhľadávanie rádioaktívnych surovín a draselných solí, rádiometrické vzorkovanie
gamaspektrometria	L P	U (0,9 ppm U), Ra (0,2 ppm eU), Th (0,4 ppm eTh), K (0,06 %K) geochemia, genéza hornín Ra (0,3 ppm eU), Th (0,6 ppm eTh), K (0,1 %K), prieskum rádioaktívnych surovín, mapovanie, litológia, genéza hornín, nepriame stanovenie niektorých nerádioaktívnych prvkov
meranie veľmi nízkych aktivít	L	štúdium hornín, datovanie pomocou ^{14}C a ^3H , hydrogeológia
autorádiografia	L	centrá rádioaktivity v horninách, genéza hornín

Vysvetlivky: $1 \text{ ppm} = 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} = 10^{-4} \%$, L – laboratórne meranie, P – povrchové meranie

Tab. 2 Prehľad metód založených na interakcii jadrového žiarenia s prvkami skúmaného geologického objektu a ich použitie v geológii (Mareš et al., 1990)

Metóda	Podmienky	Použitie, fyzikálny parameter, prvok (hranica stanoviteľnosti)
odrazené beta žiarenie	L	Z_{ef} (dif. 0,1 – 0,3), popolnatosť uhlia, obsah Fe v železných rudách
gama – gama hustotná gama – gama selektívna	P L, P	ρ (dif. 10^{-2} – 10^{-1} g·cm ⁻³), stavebná a inžinierska geológia celkový obsah ťažkých prvkov
röntgenfluorescenčná	L P	prvky so $Z > 20$ (až 50 ppm) prvky so $Z > 24$ (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, As, Ag, Sn, Sb, W, Au, Pb a i.) (0,01 – 0,5 %)
jadrová gama rezonancia	L P	Fe, Sn, Zn, Te, W, Pt – za nízkych teplôt Sn (0,01 %), Fe (1 %) – pri izbovej teplote, štúdium mikrostavby minerálov Fe Sn (0,1 %)
gama - neutrón	L, P	Be (1 ppm)
neutrón – neutrón	L P	B (0,01 %), Cd (0,01 %), Li, Au, Ag, In, Re, Rh, Ir, Ta, Co, U, TR objemová vlhkosť (dif. 0,1 – 10 kg H ₂ O m ⁻³), inžinierska geológia, B (0,01 % B ₂ O ₃)
neutrón - gama	L	Ni (0,2 %), Fe (0,5 %), Cr (0,5 - 1 %), S (0,2 - 1 %), Ca (1 – 5%)
pomalé neutróny	L	štiepiteľné prvky (ppm)
stopy štiepných produktov	L	U (10^{-6} ppm), Th, B (ppm), Li (10 ppm), mikrodistribúcia štiepných prvkov, geochronológia

Vysvetlivky: Z_{ef} – efektívna hodnota protónového čísla viacprvkového materiálu, ρ – objemová hmotnosť (g·cm⁻³), L – laboratórne meranie, P – povrchové meranie

2. RÁDIOMETRICKÉ METÓDY PRIESKUMU

Rádiometrické prieskumné metódy umožňujú na základe merania rádioaktivity hornín, vôd a vzduchu vyhľadávať rádioaktívne suroviny, mapovať a charakterizovať geologické štruktúry, určovať poruchové línie a v priaznivých prípadoch realizovať aj prieskum nerádioaktívnych surovín. V ostatnej dobe sa tieto metódy vo veľkej miere využívajú pre environmentálne účely, a to na charakterizáciu geofaktorov životného prostredia skúmaného územia z hľadiska rádioaktivity. Na tieto účely sa používajú ako údaje namerané pri starších prieskumoch, tak aj údaje získané novými meraniami pomocou najnovších metodík vyvinutých v rámci jednotlivých rádiometrických prieskumných metód.

Pri zisťovaní rádioaktivity prírodného prostredia sa uplatňujú tieto rádiometrické prieskumné metódy:

1. letecký gama prieskum (aerogamaprieskum)
 - a. letecký gama prieskum (meranie celkovej gama aktivity)
 - b. letecká gamaspektrometria (meranie spektrometrické)
2. povrchový gama prieskum
 - a. automobilový gama prieskum (autogamaprieskum)
 - i. automobilový gama prieskum (meranie celkovej gama aktivity)
 - ii. automobilová gamaspektrometria (meranie spektrometrické)
 - b. peší gama prieskum
 - i. peší gama prieskum (meranie celkovej gama aktivity)
 1. povrchový gama prieskum
 2. gama prieskum v jamkách
 - ii. pešia gamaspektrometria (meranie spektrometrické)
 - iii. povrchové premeriavanie horského reliéfu (PPHR)
3. hĺbkový gama prieskum
 - a. hĺbkový gama prieskum (meranie celkovej gama aktivity)
 - b. hĺbková gamaspektrometria (meranie spektrometrické)
4. emanometria (emanačný prieskum, pôdna emanometria)
5. rádiometrické vzorkovanie
6. laboratórne analýzy
7. meranie rádioaktivity morského (jazerného) dna.

2.1 Voľba metód prieskumu

Voľba metód a typu prieskumu závisí od riešenej úlohy, druhu nerastnej suroviny a jej genézy, veľkosti skúmanej oblasti, jej prístupnosti, typu povrchových útvarov, preskúmanosti územia, technickej vybavenosti a ekonomických ukazovateľov prác. Pri realizácii prieskumných prác sa uplatnia princípy analógie, postupného približovania a maximálnej efektívnosti (Mareš et al., 1990). Etapy prác zahŕňajú prognózne ocenenie územia (orientačný, resp. vyhľadávací prieskum), vyhľadávanie a prieskum záujmových objektov (podrobný prieskum) a sledovanie, spresňovanie a kontrola vplyvov geologických činiteľov na geologické a životné prostredie (doplnkový, resp. ťažobný prieskum) (Vyhláška MŽP SR 51/2008 Z.z.).

Základným kritériom pri vyhľadávaní rádioaktívnych surovín a rádiometrickom mapovaní je obnaženie hornín. V zakrytých oblastiach sa volí vrtný prieskum a emanometria, v odkrytých oblastiach letecký prieskum a povrchový prieskum. Letecký prieskum sa uplatňuje najmä pri meraní veľkých plôch alebo území so zlou dostupnosťou. Letecká gamaspektrometria poskytuje údaje o geochemii hornín a je podkladom pre následné detailné pozemné meranie. Povrchový prieskum môže byť realizovaný automobilovou gamaspektrometriou alebo peším gama prieskumom. Detailný pozemný prieskum je zameraný na zistenie parametrov anomálií rádioaktivity a výskum vymedzených geologických objektov. V tomto štádiu prác sa používa pešia gamaspektrometria, emanometria, hĺbkový gama prieskum a rádiometrické vzorkovanie (Mareš et al., 1990). Vo všetkých etapách prieskumných prác sú výsledky in situ meraní rádioaktivity hornín konfrontované s výsledkami laboratórnych analýz rádioaktivity vzoriek hornín odobratých ako z prírodných odkryvov, tak aj z umelých odkryvov (kameňolomy, technické výkopové diela a rýhy), banských diel a jadier vrtov. Laboratórne analýzy podávajú finálne informácie o kvalite rádioaktívnej rudy zasiahnutej vrtmi a umožňujú výpočet zásob.

Efektívne uplatnenie rádiometrických metód je viazané na komplexnosť geofyzikálnych, geochemických a geologických výskumov.

Z uvedeného zoznamu rádiometrických prieskumných metód a zo znalosti ich fyzikálneho princípu merania vyplýva, že najviac sa na charakteristiku rádioaktivity hornín využíva detekcia gama žiarenia. Iba v prípade emanometrie ide o detekciu

alfa žiarenia. Laboratórne metódy umožňujú meranie všetkých fyzikálnych druhov rádioaktívneho žiarenia na horninových vzorkách.

2.1.1 Základné úvahy pri plánovaní prieskumu

Pri zhotovovaní a príprave plánu geofyzikálneho prieskumu je nevyhnutné mať čo najcelistvejšie a najaktuálnejšie informácie o politických, hospodárskych a geologických charakteristikách oblasti.

Dostupnosť aktuálnych a presných topografických máp v mierke 1:100 000 a detailnejších, spolu s aktuálnymi kvalitnými satelitnými fotografickými snímkami, je prvou základnou požiadavkou, bez ktorej nie je možné začať prieskum. Kancelárska príprava prieskumu zahŕňa kompletizáciu všetkých dostupných informácií o geológii, minerálnych výskytoch (vrátane starých nálezov a výkopových prác), vegetačnom pokryve, podnebí a počasí, povrchovej hydrológii, pozemných a vzdušných komunikačných cestách, celkovej dostupnosti terénu, pracovných príležitostiach miestneho obyvateľstva, rozsahu a výsledkoch starších prieskumných prác. Prehľad geofyzikálnej preskúmanosti, úspešných aj neúspešných projektov v skúmanej oblasti alebo z iných oblastí, ale s podobnou problematikou, má vysokú hodnotu. V prípade pochybností o efektívnosti aplikácie určitej geofyzikálnej metódy v prieskumnej lokalite mali by sa jej možnosti overiť krátkymi skúšobnými testovacími meraniami. Dôležitým bodom pri výbere komplexu prieskumných metód v skúmanej oblasti je, že výber by nemal byť diktovaný iba možnosťami finančného rozpočtu, bez citlivého zváženia dôsledkov. Na druhej strane, prieskum by mal byť zrealizovaný účelne, s čo najnižšími nákladmi alebo v opačnom prípade by nemal byť realizovaný vôbec.

Efektívny prieskum znamená plánovanú postupnosť aktivít. Zahŕňa postupne sa zužujúcu záujmovú oblasť prieskumu pomocou metód, ktoré reagujú buď priamo na prítomnosť mineralizácie alebo na rysy, ktoré sú v asociácii s mineralizáciou. V začiatkoch prieskumného programu, keď nie je jasné, či vôbec existuje zaujímavá mineralizácia v prieskumnom území, je rozumné aplikovať metódy s relatívne nízkymi nákladmi na jednotkovú plochu s elimináciou povrchových meraní. Ak sú výsledkom tejto prvej fázy časti územia potenciálne nádejné na ekonomicky zaujímavý výskyt hľadanej mineralizácie, potom je na zváženie nasadenie metód s vyššími nákladmi na jednotkovú plochu, vrátane povrchových meraní. Vŕtanie

a karotážne merania ako najdrahšie prieskumné aktivity sa aplikujú až v záverečnej fáze prieskumu vo veľmi detailizovaných cieľových oblastiach so špecifickými rysmi, svedčiacimi o ekonomicky zaujímavej mineralizácii. Tab. 4 podáva postupnosť prieskumných aktivít vo všeobecnosti.

Tab. 4 Všeobecná postupnosť prieskumných aktivít (IAEA-TECDOC-186, 1979)

Fáza	Účel	Letecké	Povrchové	Pokrytie a poznámky
I	Predbežná geologická analýza Zhotovenie topografických máp	Satelitné snímky Fotogrametria, fotosnímky	Topografická povrchová kontrola	Na pokrytie celého územia Na pokrytie celého územia; výber kritických oblastí pre geologický prieskum
II	Orientačný prieskum Geofyzika a geochemia	Magnetický a rádiometrický letecký prieskum	Geologická povrchová kontrola Regionálna geochemia	Na pokrytie celého územia. Na zhotovenie regionálnych máp 1:250 000; na elimináciu povrchových meraní z ďalšieho postupu; na lokalizáciu anomálnych oblastí alebo základných rysov prítomnej mineralizácie
III	Geologické mapovanie Geofyzika Geochemia	Magnetický, rádiometrický, elektromagnetický letecký prieskum	Povrchová kontrolná a doplnková geochemia a geofyzika; podporné geologické prieskumy	Limitované na napr. 30 % celého územia. Na vybratie zón detailného povrchového prieskumu.
IV	Detailný povrchový prieskum	Vrtuľníková geofyzika	Všetky aplikovateľné metódy povrchovej geofyziky, napr. elektrické, seizmické, ... Pôdna a podpovrchová geochemia. Meranie v jamkách a ryhách. Detailná geológia.	Limitované na napr. 5 % celého územia. Na nájdenie a analyzovanie mineralizácie; na lokalizáciu miest vŕtania.
V	Podpovrchový prieskum		Vŕtanie a geofyzika vo vrtoch	Limitované na napr. 0,05 % celého územia. Na potvrdenie existencie, stupňa a moci mineralizácie.

2.1.2 Vzťah medzi leteckými a povrchovými meraniami

Plocha zameraná pri povrchovom pešom profile je oveľa menšia ako plocha toho istého profilu pri leteckom meraní (tab. 5). Kým detektor vo výške pliec registruje gama žiarenie z okruhu 10 m, detektor pri leteckom prieskume vo výške 125 m registruje žiarenie z okruhu 25-krát väčšieho. Letecký systém meria a zbiera údaje 100-krát rýchlejšie ako operátor pri pešom prieskume. Rýchlosť prieskumu lokality je takto asi 2500-krát vyššia pri leteckom ako pri pešom meraní.

Vo všeobecnosti, letecké merania by mali byť realizované pred povrchovými meraniami. Povrchové pešie merania by mali byť primárne realizované následne po leteckých meraniach za účelmi presného lokalizovania, identifikácie a detailizácie anomálií nájdených zo vzduchu. Vhodný letecký merací systém musí zabezpečovať svojou citlivosťou oprávnenosť realizácie následných peších meraní. Preto stanovené špecifikácie leteckého prieskumu musia byť pozorne kontrolované, aby bola 100 % istota, že sú dosiahnuté požadované detekčné limity a požiadavky plošného rozlíšenia. V prípade pochybností ohľadne požadovaných parametrov leteckého systému musia byť neodkladne realizované príslušné vhodné testovacie merania.

Pešie merania by mali byť realizované prednostne pred leteckými iba v prípade otvorenej krajiny s ľahkým prístupom k meracím bodom a ak je prieskumná plocha malá. Nevýhodou pešieho prieskumu je v prípade nasadenia veľkého počtu prístrojov s operátormi problém zabezpečenia štandardizovaných čítaní a systematickej kompilácie údajov.

Automobilový povrchový prieskum slúži normálne iba ako predbežný vyhľadávací prieskum, a to hlavne v oblastiach dobre pokrytých cestami. Výška detektora umožňuje snímanie gama žiarenia z plochy z okruhu cca 20 m, čo je takisto nevýhodné v porovnaní s leteckým prieskumom (tab. 5). Okrem toho, poľné cesty zvyčajne vedú miestami s najľahšou priechodnosťou terénom, takže sa môžu vyhýbať význačným geologickým rysom krajiny. Otvorené ploché krajiny s trávnatým alebo veľmi riedkym stromovým a kríkovým porastom predstavujú jediné prostredie, kde automobilový prieskum by mohol byť v produktivite porovnateľný s leteckým.

Tab. 5 Šírkový dosah metód gama prieskumu (Gruntorád et al., 1985)

Meranie	Výška detektora (m)	Priemer plochy 2r (m)
Letecké	50	330
	100	470
Automobilové	1	20
	1,5	35
Pešie	0,02	0,4
	0,15	3,0

2.2 Rádiometrické gama metódy

2.2.1 Základy gama metód

2.2.1.1 Terestriálne gama žiarenie

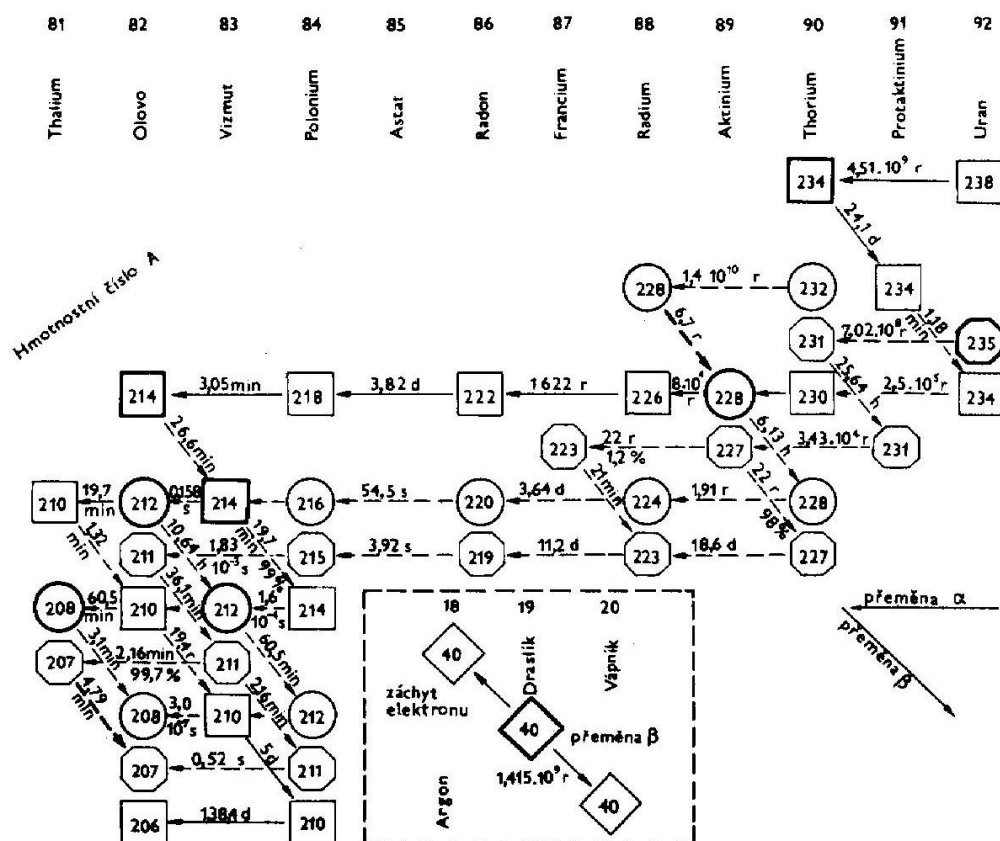
Elektromagnetické gama kvantá, na rozdiel od nabitých alfa a beta častíc, nemajú ani hmotnosť ani náboj a preto predstavujú najpriaznivejšie rádioaktívne žiarenie, čím prinášajú do detektora informáciu o rádioaktivite a stavbe z najväčšieho objemu horninového prostredia. Hlavnými zdrojmi terestriálneho gama žiarenia sú:

- ^{40}K , ktorý tvorí 0,012 % v zmesi izotopov draslíka,
- rozpadové produkty rozpadového radu ^{238}U a rozpadového radu ^{235}U ,
- rozpadové produkty rozpadového radu ^{232}Th ,

kde gama žiarenie vzniká ako doprovdné žiarenie pri jadrových premenách nestabilných izotopov (IAEA-TRS-174, 1976) (obr. 1). Táto zložka gama žiarenia poskytuje geologickú informáciu o rádioaktivite horninového prostredia.

Obsah ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th závisí od typu horniny a od geologického prostredia. Tab. 6 podáva typické obsahy v niektorých bežných horninových typoch.

Vo väčšine prípadov sú materské horniny na povrchu zvetrané a pokryté zvetralinovým povrchom a pôdou. Preto gama žiarenie pôd je hlavnou zložkou terestriálneho gama žiarenia. Obsah rádioaktívnych minerálov v pôde závisí od ich obsahu v podložnej materskej hornine. Tab. 7 podáva priemerné koncentrácie ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th v pôdach s odpovedajúcimi hodnotami dávkového príkonu vo vzduchu a expozičného príkonu.



Obr. 1 Přírodní radioaktivní rozpadové rady ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th a rozpad ^{40}K . Hruba orámované izotopy sú používané v terénnej a laboratórnej gamaspektrometrii (Mareš et al., 1990)

Tab. 6 Typické koncentrácie ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th vo vybraných bežných horninách a odpovedajúce hodnoty dávkového príkonu vo vzduchu a expozičného príkonu (vypočítané pre výšku 1 m nad povrchom terénu) (IAEA-TECDOC-566, 1990)

Hornina	^{40}K [%]	^{238}U [ppm eU]	^{232}Th [ppm eTh]	Dávkový príkon vo vzduchu [pGy·s ⁻¹]	Expozičný príkon [μR·h ⁻¹]
Granit	3 - 4	3 - 5	10 - 30	25 - 50	10 - 20
Gabro	< 1	< 1	2 - 3	4 - 7	2 - 3
Vápenec	< 1	1 - 2	1 - 2	4 - 7	2 - 3
Pieskovec	1 - 2	3 - 5	10 - 15	15 - 25	5 - 10
Priemer	2,5	2,7	9,6	20,0	8,3

Tab. 7 Priemerné koncentrácie ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th v pôde a odpovedajúce hodnoty dávkového príkonu vo vzduchu a expozičného príkonu (vypočítané pre výšku 1 m nad povrchom terénu) (IAEA-TECDOC-566, 1990)

Pôda	^{40}K [%]	^{238}U [ppm eU]	^{232}Th [ppm eTh]	Dávkový príkon vo vzduchu [pGy·s ⁻¹]	Expozičný príkon [μR·h ⁻¹]
podľa UNSCEAR, 1982	1,2	2,0	6,3	12	5
podľa Kogan et al., 1971	1,4	1,6	6,0	12	5

2.2.1.2 Gama žiarenie pozadia (background)

Okrem terestriálneho gama žiarenia, ktoré prináša geologickú informáciu, registruje detektor gama žiarenia umiestnený na povrchu alebo vo vzduchu nad povrchom aj ďalšie príspevky gama žiarenia, ktoré nenesú geologickú informáciu a predstavujú rádioaktivitu pozadia (background). Hlavnými zdrojmi gama žiarenia pozadia sú: kozmické žiarenie, rozpadové produkty ^{222}Rn v atmosfére, rádioaktívne kontaminanty a prírodné rádionuklidy akumulované a premiestnené činnosťou človeka.

2.2.1.2.1 Kozmické žiarenie

Tok primárneho kozmického žiarenia narastá pozvoľne s geomagnetickou šírkou a do rozsahu $\pm 10\%$ je jeho veľkosť modulovaná 11-ročným slnečným cyklom. Sekundárne kozmické žiarenie vznikajúce v nižších vrstvách atmosféry je tvorené z väčšej časti gama žiarením a z menšej časti nabitými časticami. Intenzita kozmického žiarenia narastá veľmi významne s nadmorskou výškou miesta merania a v nadmorskej výške 2000 m n.m. prevyšuje intenzitu na úrovni morskej hladiny o cca 75 % (IAEA-TRS-186, 1979).

Mapa dávkového príkonu kozmického žiarenia v zásade kopíruje mapu nadmorských výšok podľa vzťahu (Murith and Gurtner, 1990 in Daniel et al., 1996)

$$\dot{D}_a(\text{cosmic}) = 37 \cdot e^{0,38 \cdot h} [\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}]$$

kde h je nadmorská výška v km.

Pozadie merané Geiger - Müllerovou počítacou trubicou pochádza hlavne od kozmického žiarenia, lebo jeho nabité častice sú detegované s takmer 100 %-nou účinnosťou. Scintilačné detektory môžu kozmické gama žiarenie detegovať v spektrálnom okne nad 3 MeV (IAEA-TRS-186, 1979).

2.2.1.2.2 Rozpadové produkty ^{222}Rn v atmosfére

^{222}Rn exhaluje z hornín a pôd do atmosféry, pričom intenzita tohto procesu závisí od meteorologických faktorov, hlavne pôdnej vlhkosti, barometrického tlaku a rýchlosti vetra. Vďaka relatívne dlhej dobe polpremeny (3,8235 dňa) môže byť ^{222}Rn v atmosfére transportovaný na značné vzdialenosti. Dva najintenzívnejšie gama žiariče spomedzi rozpadových produktov ^{222}Rn , izotopy ^{214}Bi a ^{214}Pb , sú v atmosfére prítomné ako kladne nabité ióny adsorbované na atmosférických prachových časticiach (aerosóloch). Ich koncentrácia a distribúcia je silne ovplyvnená zmiešavacími podmienkami v atmosfére (IAEA-TRS-186, 1979).

Tab. 8 ukazuje, že úhrnný tok gama žiarenia rozpadových produktov ^{222}Rn v atmosfére môže narásť o viac ako jeden rád s nárastom atmosférickej stability. Tiež je zjavné, že hodnota pozadia je vyššia vo výškach, v ktorých sa realizuje letecký prieskum ako na úrovni povrchu. Zároveň, terestriálne gama žiarenie sa výrazne zoslabuje s rastúcou výškou. Z toho vyplýva, že tzv. vzdušný radón predstavuje vážnejší problém pre letecký ako povrchový prieskum. Obzvlášť nepriaznivé podmienky môžu nastať, keď je silná inverzia doprevádzaná inverznou vrstvou. Takáto vrstva pôsobí ako lapač častíc a tým prispieva k ďalšiemu zvýšeniu hodnoty pozadia v letovej výške. V mnohých prípadoch je preto potrebné monitorovať atmosférickú rádioaktivitu pomocou dodatočného NaI(Tl) detektora, ktorý je tienený voči terestriálnemu žiareniu zdola (IAEA-TRS-186, 1979).

Výrazné variácie pozadia často nastávajú počas búrok. Kladne nabité vzdušné aerosóly sú odnesené záporne nabitými oblakmi, čím sa atmosférická rádioaktivita môže dočasne zmenšiť až 10-násobne (IAEA-TRS-186, 1979). Následné dažďové zrážky splachujú rozpadové produkty vzdušného radónu na zemský povrch, ktorý vykazuje zvýšené hodnoty gama žiarenia po dobu niekoľkých hodín. V takomto

případe akýkoľvek druh gama prieskumu musí byť pozastavený minimálne na dobu 3 – 4 hodín, počas ktorých sa rozpadnú spláchnuté rozpadové produkty ^{222}Rn .

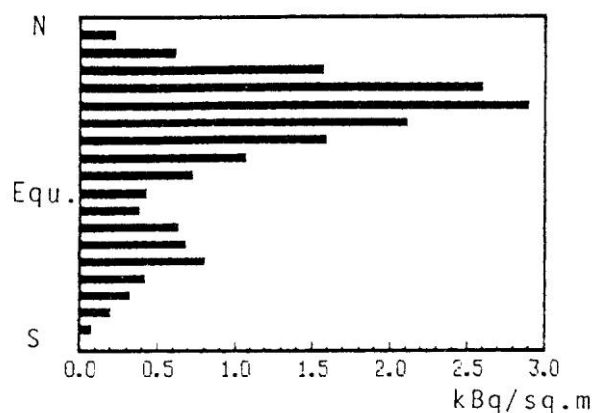
Tab. 8 Typické hodnoty hustoty úhrnného toku gama žiarenia od rozpadových produktov ^{222}Rn v atmosfére za rôznych zmiešavacích podmienok (IAEA-TRS-186, 1979)

Vzdialenosť od povrchu [m]	$\gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$			
	Intenzívne zmiešavanie	Normálna turbulencia	Slabé zmiešavanie	Intenzívna inverzia
1	0,08	0,17	0,40	1,7
150	0,13	0,31	0,58	1,8

2.2.1.2.3 Rádioaktívne kontaminanty

Rádioaktívny spád

Testy jadrových zbraní v atmosfére od r. 1945 mali za následok globálnu kontamináciu zemského povrchu štíepnymi produktmi a umelými rádioizotopmi. Najproblematickejším z nich je ^{137}Cs s dlhou dobou polpremeny (30 rokov) a malou schopnosťou migrácie. Ďalšie umelé rádioizotopy s kratšími dobami života boli prítomné určitý čas. Relatívna distribúcia rádioaktívneho spádu na zemskom povrchu je funkciou zemepisnej šírky a je znázornená na obr. 2. Sumárna priemerná depozícia ^{137}Cs v severnom miernom pásme (40° - 50° sev. zem. šírky) bola ohodnotená na $2,9 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ v 90. rokoch 20. storočia (IAEA-TECDOC-566, 1990).



Obr. 2 Sumárna priemerná depozícia ^{137}Cs na severnej a južnej pologuli (IAEA-TECDOC-566, 1990)

Ďalšími zdrojmi distribúcie umelých rádionuklidov v atmosfére emitujúcich gama žiarenie sú nehody jadrových elektrární, úniky a straty medicínskych a priemyselných žiaričov a havárie satelitov na jadrový pohon. Významným príspevkom k terestriálnemu gama žiareniu bola nehoda jadrového reaktora vo Windscale (Veľká Británia) v r. 1958 a Černobyle (ZSSR) v r. 1986, úniky izotopových žiaričov v Mexiku (1985) a Brazílii (1987) a pád satelitu na jadrový pohon v Kanade (1978) (IAEA-TECDOC-566, 1990).

Umelé izotopy rádioaktívneho spádu emitujú gama žiarenie (tab. 9), ktoré je detegované spolu s gama žiarením prírodných rádionuklidov. Energia ich gama žiarenia je vo všeobecnosti nižšia ako 1 MeV.

Tab. 9 Významné rádionuklidy rádioaktívneho spádu, ktoré sú zdrojmi gama žiarenia (IAEA-TECDOC-566, 1990)

Izotop	Doba polpremeny	Energia gama žiarenia [keV]
⁹⁵ Nb	35,15 d	766
⁹⁵ Zr	65,5 d	724, 757
¹⁰³ Ru	39,5 d	497, 610
¹⁰⁶ Ru	368,2 d	622
¹³¹ I	8,05 d	284, 364, 637
¹³² I	2,38 h	523, 630, 668, 773, 955
¹³⁴ Cs	750 d	569, 605, 796
¹³⁷ Cs	30,12 r	662
¹⁴⁰ La	40,27 h	487, 816, 925, 1596

Najdôležitejšími rádionuklidmi spádu s najdlhšími dobami polpremeny sú ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs a ¹⁰⁶Ru.

Produkty rádioaktívneho spádu sú zvyčajne prítomné v pôdnom pokryve do hĺbky cca 15 cm (IAEA-TRS-174, 1976).

Rádioaktivita detektora a prieskumnej aparatury

Všetky detektory gama žiarenia obsahujú v sebe stopové množstva rádioaktívnych prvkov, ktoré prispievajú k hodnote pozadia. Napríklad u scintilačných detektorov, ^{40}K obsiahnuté v sklenenom obale fotonásobiča je hlavným prispievateľom k rádioaktivite pozadia (IAEA-TRS-186, 1979). Elektronický šum pochádzajúci od elektronických obvodov je ďalším príspevkom k meranému pozadiu (IAEA-TRS-174, 1976).

Podobne prispieva celá prieskumná aparatura a používané vozidlo s obsluhou. Fosforeskujúce číslice a ručičky u hodiniek, streľky kompasov, atď. môžu obsahovať ^{226}Ra a mali by byť odstránené z blízkosti meracej aparatury. To isté platí pre kerozínové petrolejové lampy, ktorých obal často obsahuje tórium. Staré typy lietadiel a vrtuľníkov môžu obsahovať relatívne veľké množstvo ^{226}Ra v palubných prístrojoch a výstražných označeniach. Pre použitie týchto prostriedkov na prieskum je nevyhnutné takéto prístroje vymeniť (IAEA-TRS-186, 1979).

2.2.1.2.4 Prírodné rádionuklidy akumulované a premiestnené činnosťou človeka

V súčasnej dobe existuje množstvo nových zdrojov ožiarenia, ktoré sú priamym dôsledkom technologických aktivít človeka. Príkladom sú tepelné elektrárne spaľujúce uhlie a rašelinu, výroba a využívanie geotermálnej energie, skládky a navážky uránových a fosfátových baní a aplikácia fosfátových umelých hnojív na poliach. Tieto aktivity môžu zvýšiť hodnotu gama žiarenia meraného na povrchu alebo zo vzduchu. Akumulovaná koncentrácia ^{226}Ra z umelých hnojív v západnom Nemecku predstavuje priemerný dávkový príkon vo vzduchu cca $0,2 \text{ pGy} \cdot \text{s}^{-1}$ (IAEA-TECDOC-566, 1990).

2.2.1.2.5 Meranie gama žiarenia pozadia

Jazerá, rieky a otvorené more sú najvhodnejšími miestami na meranie gama žiarenia všetkých zdrojov pozadia okrem rádioaktívneho spádu. Stanovená hodnota však nemusí byť reprezentatívna, pretože koncentrácia rozpadových produktov ^{222}Rn v atmosfére je nižšia nad vodou ako nad súšou.

Pretože terestriálne gama žiarenie s nízkymi energiami môže byť detegované niekoľko stoviek metrov od pobrežnej línie, pozadie prístrojov merajúcich celkovú

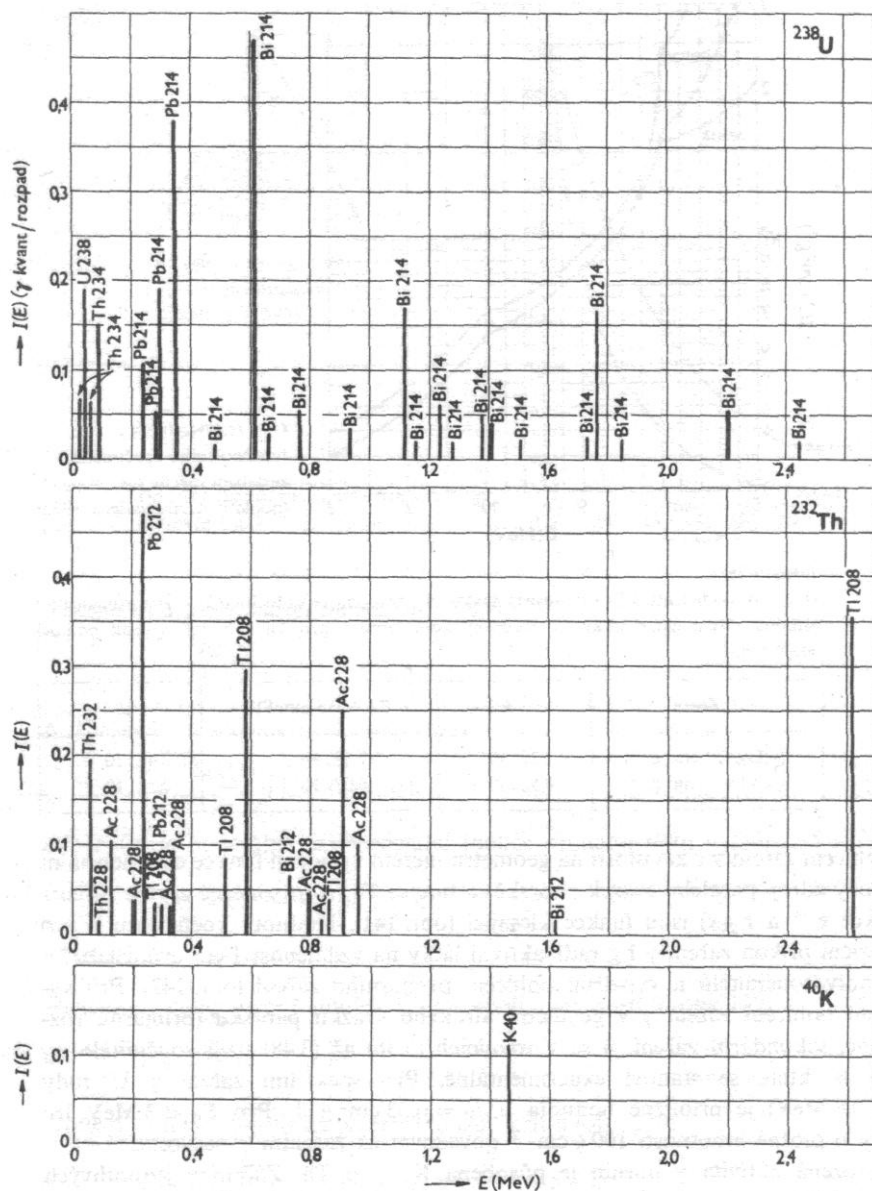
gama aktivitu by malo byť určované nad veľmi veľkými vodnými telesami (IAEA-TRS-186, 1979).

2.2.1.3 Fyzikálne základy gama žiarenia

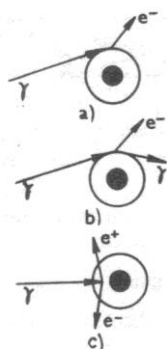
Gama žiarenie vzniká ako doprovodné žiarenie pri rôznych typoch jadrových premien. Energia gama kvanta je funkciou energetickej nerovnováhy vzniknutej počas alfa alebo beta premeny každého rádioizotopu a preto je charakteristická pre každú jednotlivú jeho premenu. Relatívna intenzita jednotlivého primárneho gama žiarenia je vyjadrená počtom gama kvánt vzniknutých počas každého rádioaktívneho rozpadu (IAEA-TRS-174, 1976). Primárne gama žiarenie jednotlivých rádionuklidov je charakterizované energiou E vyjadrenou v elektrónvoltoch (eV) a intenzitou línie $I(E)$ danou počtom uvoľnených gama kvánt na 1 rozpad. Spektrá energií primárneho gama žiarenia sa označujú ako emisné čiarové spektrá (obr. 3).

Pri prechode gama žiarenia hmotou nastáva interakcia gama kvánt s atómami hmoty vo forme 3 procesov (obr. 4):

- a) fotoelektrický efekt (fotoefekt) – v ňom gama kvantum odovzdáva celú svoju energiu viazanému elektrónu, čím ho vyráža z elektrónového obalu. Samotné gama kvantum zaniká. Tento proces prevláda u gama kvánt s nižšou energiou a v prostredí s vyšším protónovým číslom.
- b) Comptonov jav (rozptyl) – v ňom gama kvantum vyráža viazaný elektrón z elektrónového obalu, pričom samotné nezaniká, ale pokračuje v dráhe, ktorá je odchýlená od pôvodného smeru (rozptyl gama kvánt). Tento proces prevláda u gama kvánt so strednými energiami a v prostredí so širokým intervalom protónového čísla.
- c) tvorba párov elektrón-pozitrón – v ňom gama kvantum úplne zaniká (anihiluje) v elektrostatickom poli jadra atómu a celá jeho energia je využitá na vznik páru elektrón-pozitrón. Gama kvantum musí mať energiu väčšiu ako 1,02 MeV, pretože pokojová energia každého člena páru je rovná 0,501 MeV. Tento proces prevláda u gama kvánt s vysokými energiami nad 1,02 MeV a v prostredí s vysokým protónovým číslom (IAEA-TRS-174, 1976).

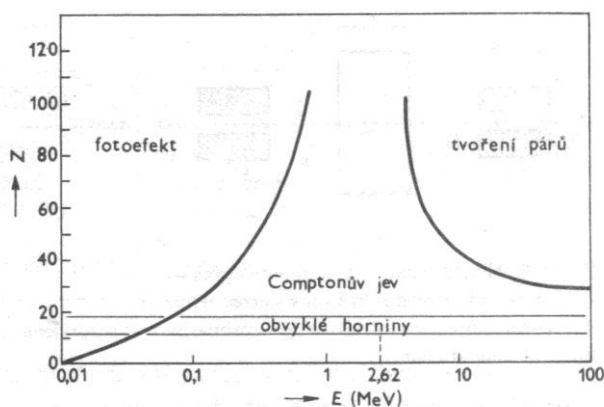


Obr. 3 Emisné spektrá energií primárneho gama žiarenia produktov rozpadových radov ^{238}U , ^{232}Th a draslíka ^{40}K (Kogan et al., 1969 in Mareš et al., 1990)



Obr. 4 Schéma fotoefektu (a), Comptonovho rozptylu (b) a tvorby párov elektrón-pozitrón (c) (Mareš et al., 1990)

Na obr. 5 sú znázornené oblasti dominancie jednotlivých procesov interakcie vo vzťahu k energii gama žiarenia a hodnote protónového čísla prostredia. S nástupom Comptonovho rozptylu, gama kvantá postupne strácajú svoju energiu procesom rozptylu, až kým nízkoenergetické kvantá nie sú úplne pohltené procesmi fotoelektrického efektu. Comptonov rozptyl je dominantnou interakciou medzi gama žiarením prírodných rádionuklidov a bežnými horninami priemerného zloženia.



Obr. 5 Oblasti dominantnej interakcie gama žiarenia fotoefektom, Comptonovým javom a tvorbou párov elektrón-pozitrón. Z – protónové číslo; E – energia žiarenia (Mareš et al., 1990)

V dôsledku interakcie gama žiarenia s atómami hmoty dochádza k poklesu intenzity gama žiarenia, ktorý je charakterizovaný lineárnym koeficientom zoslabenia gama žiarenia μ [m^{-1}]. Hodnota μ závisí od energie žiarenia E , objemovej hmotnosti prostredia ρ a jeho zloženia, ktoré je možné charakterizovať efektívnou hodnotou protónového čísla prostredia Z_{ef} . Pre vodu, vzduch a horniny zložené prevažne z ľahkých prvkov je možné Z_{ef} stanoviť približne podľa vzťahu (Mareš et al., 1990)

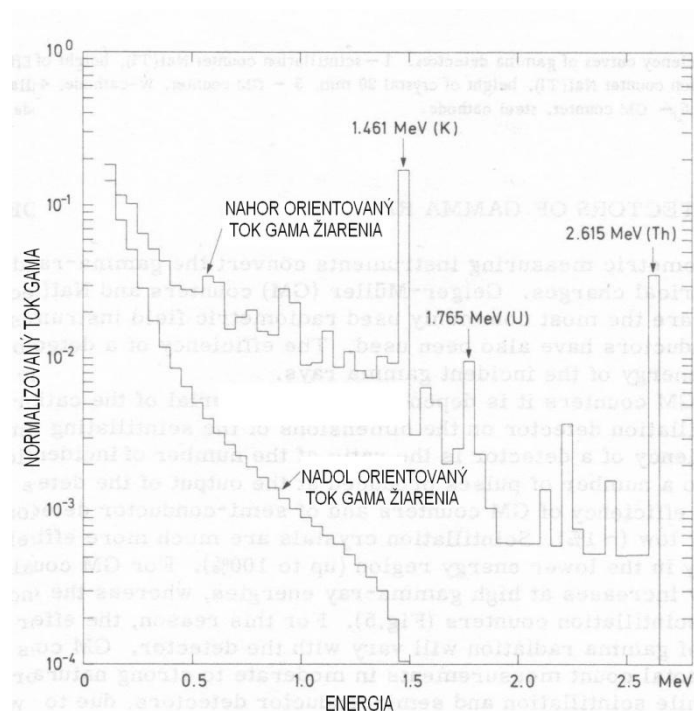
$$Z_{\text{ef}} = \frac{\sum Q_i \frac{Z_i^2}{A_i}}{\sum Q_i \frac{Z_i}{A_i}},$$

kde Z_i je protónové číslo prvku i , A_i je hmotnostné číslo prvku i a Q_i je hmotnostná koncentrácia prvku i [$\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$]. Pre vzduch, vodu a uhlie je $Z_{\text{ef}} \sim 7,5$, pre bežné horniny je $Z_{\text{ef}} \sim 11$ až 15 , pre rudy je $Z_{\text{ef}} > 20$ (Mareš et al., 1990).

Hmotnostný koeficient zoslabenia je

$$\mu_m = \mu \cdot \rho^{-1} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

V dôsledku Comptonovho rozptylu v hornine a atmosférickom vzduchu je spektrum primárneho gama žiarenia rádioaktívnych prvkov horniny zmenené a silne ovplyvnené najmä v oblasti energií do 200 keV . Obr. 6 znázorňuje distribúciu energie toku gama žiarenia 1 m nad povrchom s obsahom $3,4 \%$ K, 3 ppm eU a 12 ppm eTh, pričom sú spektrá pre nahor a nadol orientovaný tok gama žiarenia znázornené oddelene. Nadol orientovaný tok gama žiarenia je výsledkom spätného rozptylu primárneho gama žiarenia hornín v atmosférickom vzduchu a jeho veľkosť závisí od plošnej rozľahlosti rádioaktívneho telesa (IAEA-TRS-174, 1976). V ľubovoľnej výške nad povrchom tvorí spätne rozptýlené gama žiarenie vo väčších výškach asi 30% z celkového toku. Toto gama žiarenie nenesie žiadnu informáciu o skladbe zdroja primárneho gama žiarenia (IAEA-TRS-186, 1979).

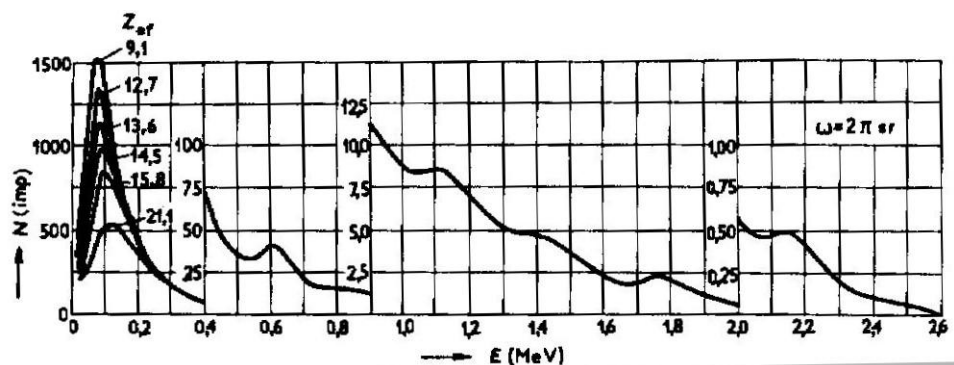


Obr. 6 Normalizovaný tok gama žiarenia 1 m nad povrchom (IAEA-TRS-174, 1976)

Prechodom primárneho gama žiarenia hmotou (horninou, pôdou a vzduchom) vzniká rozptýlené a sekundárne gama žiarenie. Sekundárne žiarenie zahŕňa brzdné žiarenie a charakteristické žiarenie. Všetky zložky gama žiarenia (primárne, rozptýlené, brzdné a charakteristické) spoločne vytvárajú spojité spektrum energie terestriálneho gama žiarenia v intervale od 0 do 3 MeV, ktoré sa pri detekcii prístrojmi prejavuje charakteristickými znakmi (Mareš et al., 1990).

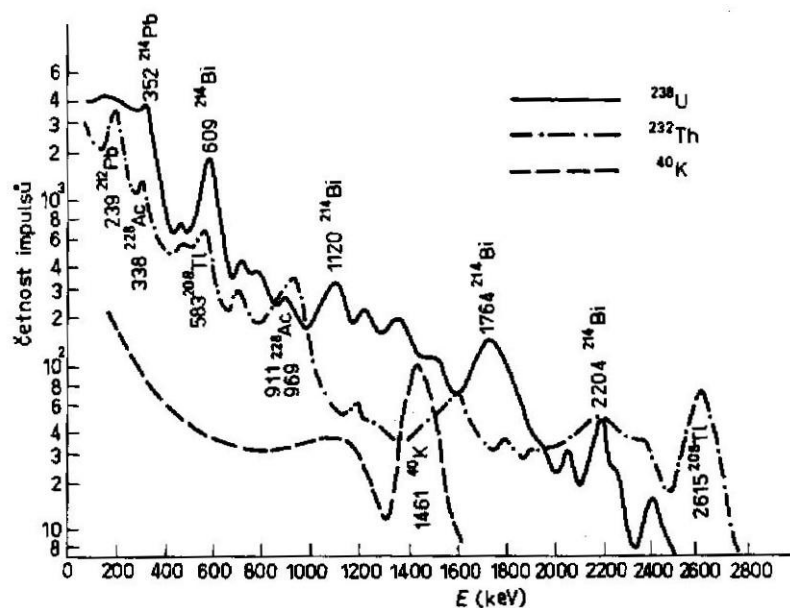
Zložené spektrum energií gama kvánt prírodných rádioaktívnych prvkov je možné rozdeliť do dvoch oblastí, 0 až 0,4 MeV a 0,4 až 2,6 MeV.

V oblasti nízkych energií ($E < 0,4$ MeV) sa uplatňuje vznik charakteristického žiarenia (0 až 0,115 MeV) a podstatný vklad rozptýleného gama žiarenia v celom intervale energie. Intenzita gama žiarenia je výrazne závislá od zloženia horniny (Z_{ef}) a málo od zdrojov žiarenia v hornine (obr. 7). Píky primárneho gama žiarenia zdrojov v hornine je v spojitom spektre obtiažne identifikovať. Vyhnúť sa týmto nevhodným vlastnostiam sa dá diskrimináciou gama kvánt s energiami do 0,4 MeV.



Obr. 7 Spektrum gama žiarenia nekonečného polpriestoru U rudy rôzneho zloženia (Troický, 1962 in Mareš et al., 1990)

V oblasti vyšších energií ($E > 0,4$ MeV) nie je závislosť hodnoty meraného poľa na zložení hornín podstatná, vklad rozptýleného žiarenia je nižší a píky primárneho žiarenia rádionuklidov sú v spojitom spektre lepšie vyčlenené (obr. 8) (Mareš et al., 1990).



Obr. 8 Prístrojové spektrum K, U, Th namerané detektorom NaI(Tl). Číselné hodnoty uvedené v keV (Mareš et al., 1990)

Pri výpočte účinkov gama žiarenia geologických telies a interpretácii nameraných hodnôt sa používajú vzťahy určujúce pole intenzity (I) gama žiarenia základných geometrických útvarov: bodového zdroja, lineárneho zdroja, plošného zdroja a trojrozmerného zdroja. Pomocou nich je možné odvodiť účinky zložitých trojrozmerných telies, nekonečného polpriestoru (geometria povrchových meraní) a nekonečného priestoru (geometria karotážnych meraní) (Mareš et al., 1990).

Pre intenzitu gama žiarenia trojrozmerného rádioaktívneho telesa platí vzťah

$$I = \frac{\omega k Q \rho}{\mu},$$

kde k – je konštanta závislá od kvality zdroja (číselne je rovná intenzite gama žiarenia vyžarovanej jednotkovou plochou v jednotkovej vzdialenosti od zdroja vo vákuu),

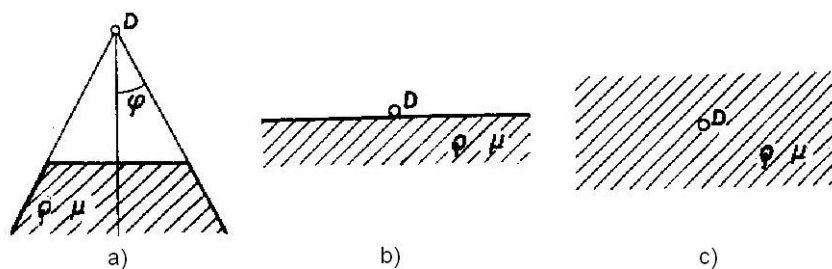
Q – je hmotnostná koncentrácia rádioaktívneho prvku [$\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$] v zdroji,

ρ – je objemová hmotnosť zdroja [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$],

μ - je lineárny koeficient zoslabenia gama žiarenia v samotnom telese zdroja,

$\omega = 2\pi(1 - \cos \varphi)$ je priestorový uhol v steradiánoch [sr] obaľujúci zdrojové teleso s vrcholom v bode detekcie, φ je rovinový uhol. $\omega = 2\pi$ sr pre nekonečný polpriestor (povrchové meranie) a $\omega = 4\pi$ sr pre nekonečný priestor (meranie vo vrtoch) (obr. 9) (Mareš et al., 1990; Gruntorád et al., 1985).

Pri gama prieskumoch rádioaktívne homogénneho a relatívne zarovnaného terénu je zvyčajne vyhovujúce považovať povrch za rovinný, nekonečný a homogénny zdroj žiarenia. Rovinný (dvojrozmerný) zdroj s nekonečnou plochou a hĺbkou je detektorom videný z každej prieskumnej výšky nad povrchom v rovnakom priestorovom uhle 2π steradiánov (IAEA-TRS-309, 1989).



Obr. 9 K intenzite gama žiarenia a) nekonečného zrezaného kužľa (trojrozmerné teleso), b) nekonečného polpriestoru a c) nekonečného priestoru. D – poloha detektora. (Mareš et al., 1990; upravené)

2.2.1.4 Štruktúra meraného poľa gama žiarenia

Pri gama prieskume realizovanom nad relatívne plochým terénom s homogénnou rádioaktivitou prichádza do detektora signál z takého objemu horniny, ktorý dodáva viac ako 50 % z terestriálneho gama žiarenia. Plošný rozsah zóny detekcie je funkciou výšky detektora nad povrchom. Detekčná zóna spoľahlivého prenosného gama prístroja je miskovitého tvaru a jej prienikom s povrchom terénu je kruh, tzv. kruh detekcie. Pre uránové okno prenosného gamaspektrometra sú polomery 50 % a 90 % kruhov detekcie približne dané vzťahmi

$$R_{50} \approx 1,6 \cdot h$$

$$R_{90} \approx 6,9 \cdot h,$$

kde h - je výška sondy detektora nad povrchom terénu (IAEA-TRS-186, 1979).

Z toho vyplýva, že detektor nesený na chrbte má niekoľko stonásobne väčšie plošné pokrytie ako detektor umiestnený priamo na povrchu horniny.

Plocha meraná pri leteckom profilovom gama prieskume má tvar oválneho pásu, ktorého dĺžka je o niečo väčšia ako samotná dĺžka meraného profilu. Šírka pásu rastie s výškou letu, ale nie priamoúmerne v dôsledku nárastu pohltienia gama kvánt v súvislosti s kosými uhlami ich dopadu. Pre vysoko citlivý spektrometer kanadskej geologickej služby pri výške letu cca 120 m nad povrchom pochádza 50 % počtu impulzov v tórovom okne z pásu širokého cca 130 m (IAEA-TRS-186, 1979) a 90 % z pásu širokého cca 400 m (IAEA-TRS-309, 1989).

Intenzita meraného poľa gama žiarenia I pri štúdiu rádioaktivity hornín je súčtom intenzity gama žiarenia vlastného pozadia prístroja I_{VP} , kozmického žiarenia I_{KZ} , rádioaktivity hornín I_{RH} , účinkov rádioaktívneho spádu I_{RS} a účinkov vzdušného radónu I_{Rn} (Mareš et al., 1990)

$$I = I_{VP} + I_{KZ} + I_{RH} + I_{RS} + I_{Rn}$$

$I_{VP} + I_{KZ} = I_p$ je hodnota intenzity gama žiarenia pozadia, ktorá sa stanovuje experimentálne, najčastejšie meraním nad hladinou vodnej plochy.

Normálne pole je strednou hodnotou rádioaktivity hornín $\bar{I}_{RH}$ homogénnej geologickej štruktúry (obr. 10). Anomália I_a je významnou odchýlkou od normálneho poľa a pri úrovni spoľahlivosti 0,997 musí spĺňať podmienku (Mareš et al., 1990)

$$I_a > 3\sqrt{\sigma_{RH}^2 + \sigma^2},$$

kde σ_{RH} – je smerodajná odchýlka premenlivosti (variability) rádioaktivity geologickej štruktúry a stanovíme ju ako $\frac{1}{2}$ šírky krivky početnosti hodnôt rádioaktivity na úrovni 0,6 jej maxima,
 σ – je štandardná odchýlka pri meraní poľa rádioaktivity daným prístrojom, t.j. pri meraní počítačom impulzov je

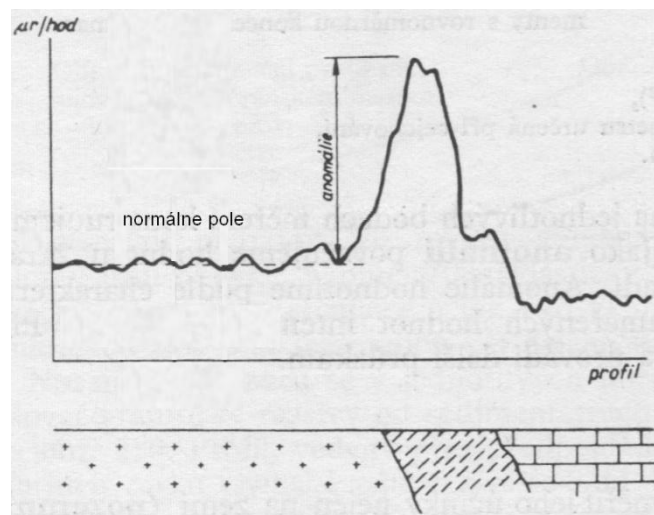
$$\sigma(N) = \sqrt{\bar{N}},$$

kde N – je počet impulzov registrovaných prístrojom za čas t ,
 $\bar{N}$ – je stredná hodnota počtu impulzov

a pri meraní rádioaktivity meračom strednej hodnoty početnosti impulzov je

$$\sigma(n) = \sqrt{\frac{n}{2RC}},$$

kde n – je početnosť impulzov [$\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$],
 RC – je časová konštanta takéhoto prístroja.



Obr. 10 Normálne pole a anomália rádioaktivity hornín (Mašín a Válek, 1963; upravené)

2.2.1.5 Hĺbkový dosah gama metód

Hĺbkový dosah gama metód závisí od: energie E_0 detegovaného žiarenia, objemovej hmotnosti ρ a zloženia Z_{ef} hmotnej prekážky (horniny, pôdy). Pre energie primárneho gama žiarenia prírodných rádioaktívnych prvkov je v rozmedzí do 0,5 m (tab. 10, 11). Pri detekcii celého zložitého spektra širokého zväzku gama kvánt je hĺbkový dosah väčší (Mareš et al., 1990).

Tab. 10 Dobeh gama kvánt v betóne (Mareš et al., 1990)

E_0 [MeV]	$\mu \cdot \rho^{-1}$ [$\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$]	$x_{0,01}$ [cm]	$x_{0,10}$ [cm]
0,1	0,169	11,60	5,80
0,4	0,0954	20,54	10,27
0,8	0,0706	27,76	13,88
1,5	0,0517	37,90	18,95
3,0	0,0363	53,92	26,96

Vysvetlivky: μ - lineárny koeficient zoslabenia gama žiarenia [m^{-1}],

ρ – objemová hmotnosť, pre betón = $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,

$x_{0,01}$ – dĺžka dráhy gama kvánt v materiáli, počas ktorej ich pôvodná intenzita I_0 klesne na 1/100, t.j. $I_x/I_0 = 0,01$ (analogicky pre $x_{0,10}$),

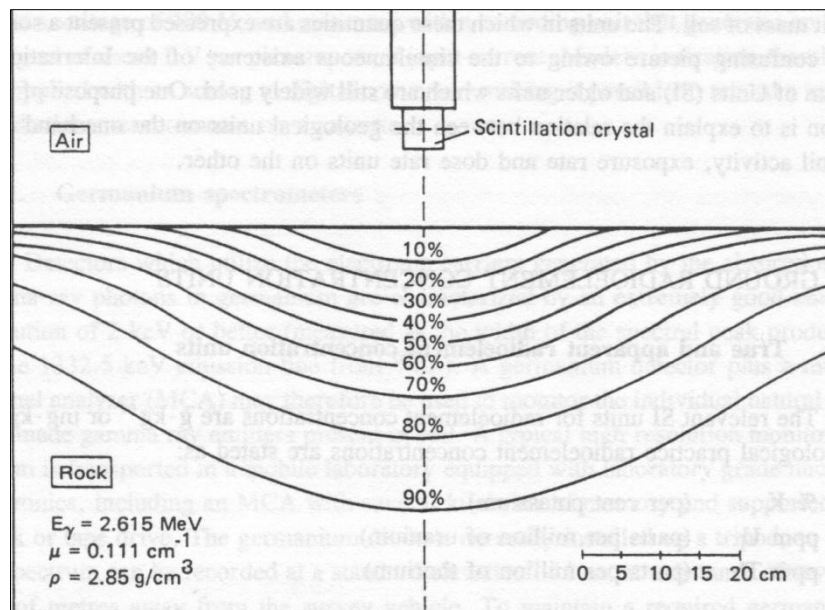
I_x – intenzita gama žiarenia po prechode vzdialenosti x v materiáli

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Tab. 11 Dobeh gama kvánt tória v prírodných materiáloch (IAEA-TRS-186, 1979)

Materiál	Stredná hodnota dobehu [m]	
	2,6147 MeV	0,2386 MeV
Granit	0,10	0,03
Pôda	0,16	0,05
Vzduch ($\rho = 1,204 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	216	72

U prenosných detektorov gama žiarenia pri povrchovom prieskume meraná horninová vzorka in situ prispievajúca 90 % k meranému signálu je miskovitého tvaru s mocnosťou cca 30 cm priamo pod bodom detekcie na povrchu terénu (IAEA-TRS-309, 1989) (obr. 11).



Obr. 11 Príspevky gama žiarenia nekonečnej vrstvy lujavritu s homogénnou distribúciou tória. Jednotlivé krivky reprezentujú hranice 10 vrstvičiek, z ktorých každá je zdrojom 10 % žiarenia o energii 2,615 MeV (IAEA-TRS-309, 1989)

2.2.1.6 Spôsoby merania gama žiarenia pri prieskume

Merania gama žiarenia hornín zahŕňajú dva spôsoby: meranie celkovej (úhrnnej) gama aktivity a gamaspektrometriu.

2.2.1.6.1 Meranie celkovej (úhrnnej) gama aktivity

V praxi sa toto meranie označuje ako rádiometria a používané prístroje rádiometre.

Toto meranie sa v teréne realizuje Geiger - Müllerovými počítacími trubicami alebo scintilačnými detektormi. Je založené na registrácii všetkých gama kvánt o energii vyššej ako je diskriminačná úroveň prístroja. Meraná početnosť impulzov n_T [imp·s⁻¹] závisí od koncentrácií Q_K , Q_U a Q_{Th} v horninách (Mareš et al., 1990)

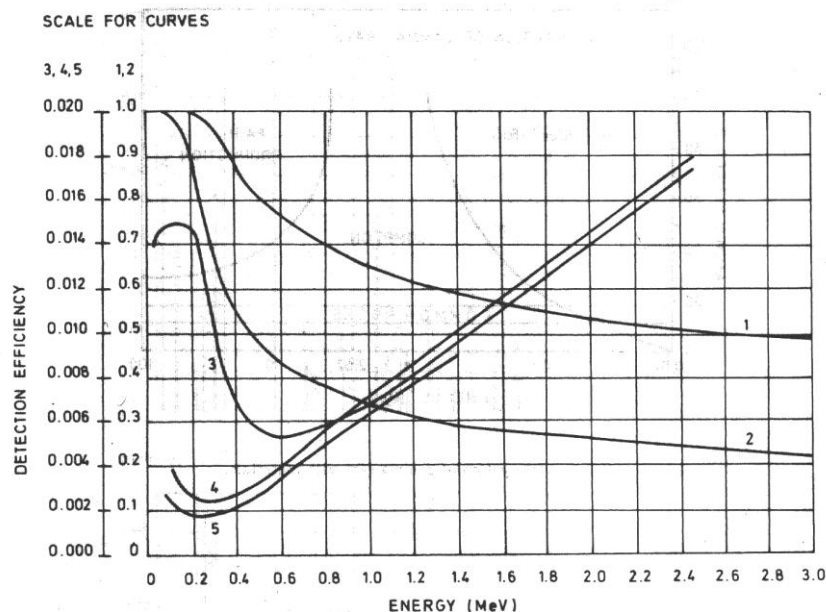
$$n_T = a_T \cdot Q_K + b_T \cdot Q_U + c_T \cdot Q_{Th} ,$$

kde a_T , b_T , c_T sú koeficienty citlivosti vyjadrujúce početnosť impulzov pre jednotkovú koncentráciu príslušného prvku; ich hodnoty závisia významne od detektora prístroja a od jeho diskriminačnej úrovne (tab. 11).

Kým u Geiger - Müllerových počítacích trubíc, ktorých účinnosť detekcie je celkovo nízka (do 1 %) a rastie so zvyšujúcou sa energiou detegovaného gama žiarenia (obr. 12), je účinnosť detekcie najmä nízkoenergetického gama žiarenia do 1 MeV daná jednoznačne materiálom katódy (W, Bi, Cu, Fe, grafit, Al, mosadz), u NaI(Tl) scintilačných detektorov je účinnosť detekcie vyššia práve v oblasti nižších energií gama žiarenia (až do 100 %) (obr. 12) a preto objem detektora (tab. 13 a 14) a rôzne nastavenia diskriminačnej úrovne veľmi významne menia ich detekčnú odozvu (tab. 12). Napríklad, NaI(Tl) detektor s diskriminačnou úrovňou 0,1 MeV a menej je pravým „rádiometrom“ na meranie celkovej gama aktivity, lebo registruje úplne všetky prichádzajúce gama kvantá, nakoľko gama kvantá do 0,1 MeV sú pohltené pevným obalom detektora. Diskriminačné úrovne v rozmedzí od 0,2 do 0,4 MeV znižujú detekčnú odozvu veľmi významne a preto by nemali byť používané u scintilačných detektorov s malým objemom na meranie celkovej gama aktivity. U veľkoobjemových detektorov ($> 10^3$ ml) umožňuje diskriminačná úroveň 0,4 MeV poskytovanie presnejších výsledkov priamo v jednotkách rádioizotopových koncentrácií (IAEA-TRS-186, 1979).

Tab. 12 Koeficienty citlivosti NaI(Tl) detektora 3,81 cm x 2,54 cm ako funkcia energie diskriminačného prahu (IAEA-TRS-174, 1976)

[MeV]	[imp·s ⁻¹]		
	1 % K	1 ppm eU	1 ppm eTh
0,15	3,6	2,7	1,2
0,20	3,0	1,9	0,86
0,30	2,1	1,1	0,47
0,40	1,6	0,68	0,33
0,50	1,3	0,53	0,25



Obr. 12 Krivky účinnosti detekcie gama detektorov: 1 – scintilačný NaI(Tl) detektor s výškou kryštálu 50 mm, 2 – scintilačný NaI(Tl) detektor s výškou kryštálu 20 mm, 3 – Geiger-Müllerov detektor s W katódou, 4 - Geiger-Müllerov detektor s Cu katódou , 5 - Geiger-Müllerov detektor s Fe katódou (IAEA-TRS-174, 1976)

Tab. 13 Citlivosti typických prenosných NaI(Tl) scintilačných detektorov (IAEA-TRS-186, 1979)

Rozmery NaI(Tl) detektora [mm]	Citlivosť [$\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$] pre 1 ppm eU	
	Nekonečný zdroj	Malý zdroj
38 x 25	5,5	3,8
51 x 51	14,5	10,3
76 x 76	36	26

Tab. 14 Citlivosti veľkoobjemových leteckých NaI(Tl) scintilačných detektorov (IAEA-TRS-186, 1979)

Rozmery NaI(Tl) detektora [mm]	Citlivosť [$\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$] pre 1 ppm eU	
	Výška letu 50 m	Výška letu 125 m
102 x 102	34	19
152 x 102	63	35
229 x 102	119	66
292 x 102	179	100

Na prevod nameraných relatívnych údajov $n_T [\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}]$ na jednotky používané na vyjadrovanie výsledkov rádiometrických meraní sa rádiometre ciachujú. Pomocou viacerých spôsobov ciachovania (pomocou bodového etalónu R_a , nad trojrozmernými etalónmi alebo nad vodným stĺpcom) je možné výsledky nameranej gama aktivity hornín vyjadriť v týchto veličinách a jednotkách:

- expozičný príkon $\dot{X}$ v $\text{pA} \cdot \text{kg}^{-1}$ alebo v staršej jednotke $\mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$, pričom $1 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1} = 0,0717 \text{ pA} \cdot \text{kg}^{-1}$ (tab. 15)
- dávkový príkon vo vzduchu $\dot{D}_a$ v $\text{pGy} \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 15)
- ekvivalentná koncentrácia uránu v ppm eU. Toto vyjadrenie je možné vďaka uránovému ekvivalentu draslíka (a_T/b_T) a uránovému ekvivalentu tória (c_T/b_T) vyjadrujúce koncentrácie uránu, ktoré môžu nahradiť príslušné koncentrácie draslíka a tória bez zmeny v meraných početnostiach impulzov.
- jednotka koncentrácie rádioaktívnych prvkov Ur (unit of radioelement concentration), pričom $1 \text{ Ur} \sim 1 \text{ ppm U} \sim 0,6 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1} \sim 0,043 \text{ pA} \cdot \text{kg}^{-1}$. Geologický zdroj s 1 Ur vyvoláva takú istú odozvu prístroja (t.j. početnosť impulzov) ako identický zdroj obsahujúci iba 1 ppm uránu v rádioaktívnej rovnováhe (IAEA-TRS-174, 1976).

Tab. 15 Teoretické hodnoty poľa gama žiarenia hornín s jednotkovou koncentráciou rádioaktívneho prvku pri homogénnej distribúcii a geometrii nekonečného polpriestoru $\omega = 2\pi sr$ (Mareš et al., 1990)

Koncentrácia v hornine	Expozičný príkon $\dot{X}$ [$\text{pA} \cdot \text{kg}^{-1}$]	Dávkový príkon $\dot{D}_a$ [$\text{pGy} \cdot \text{s}^{-1}$]	Expozičný príkon $\dot{X}$ [$\mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$]
1 %K	0,108	3,633	1,505
1 ppm U	0,047	1,576	0,653
1 ppm Th	0,021	0,693	0,287

2.2.1.6.2 Meranie gamaspektrometrické

V praxi sa toto meranie označuje ako gamaspektrometria a používané prístroje gamaspektrometre.

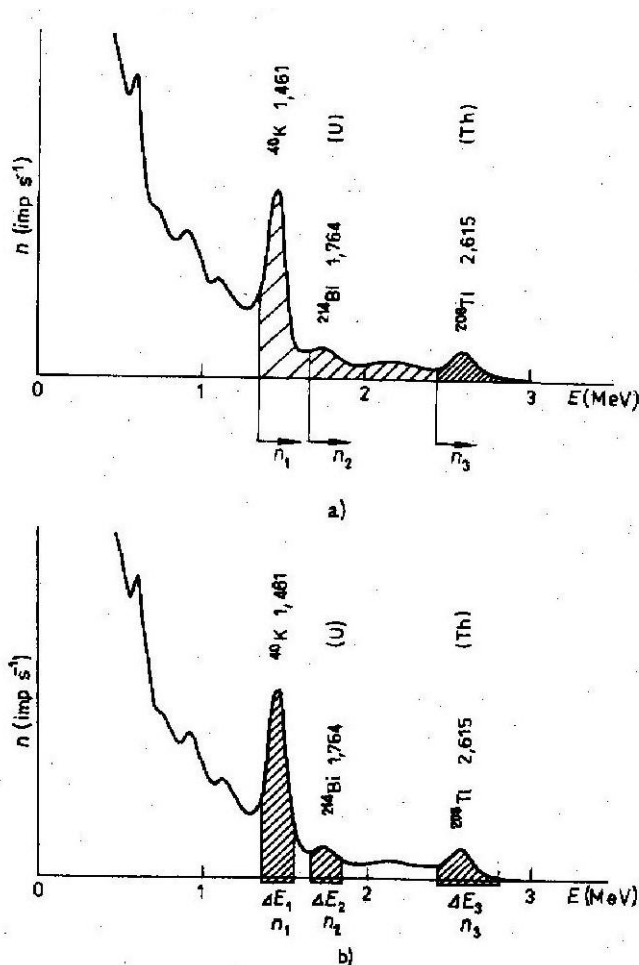
V terénnych podmienkach sa toto meranie používa na stanovenie obsahov ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , ale aj niektorých umelých rádioizotopov pomocou gamaspektrometrov so scintilačnými detektormi NaI(Tl), BGO (zložením $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), CsI(Tl). Meranie je založené na skutočnosti, že veľkosť toku primárneho gama žiarenia veľkého zdroja je priamoúmerná koncentrácii rádioaktívneho žiariča v zdroji.

Na stanovenie K, U a Th v terénnych podmienkach sa najčastejšie používajú oblasti energie gama žiarenia 1,46 MeV (^{40}K), 1,76 MeV (^{214}Bi , člen rozpadového radu ^{238}U) a 2,615 MeV (^{208}Tl , člen rozpadového radu ^{232}Th) (tab. 16), kde rádionuklidy majú značnú intenzitu línií energie a neprekrývajú sa s líniami iných rádionuklidov (obr. 3 a 8).

Tab. 16 Okná spektrálnej energie zvyčajne používané u terénnych gamaspektrometrov (IAEA-TECDOC-566, 1990)

Analyzovaný prvok	Používaný izotop	Energia gama žiarenia [MeV]	Energetické okná [MeV]
^{40}K	^{40}K	1,46	1,37 – 1,57
^{238}U	^{214}Bi	1,76	1,66 – 1,86
^{232}Th	^{208}Tl	2,615	2,40 – 2,80

Stanovenie K je priame, výsledky sa vyjadrujú v %K; stanovenie U a Th je nepriame, výsledky sa vyjadrujú v ppm eU a ppm eTh. Prahové gamaspektrometre merajú s úrovňami diskriminácie energie približne 1,35 MeV (n_1), 1,65 MeV (n_2) a 2,45 MeV (n_3) a diferenciálne gamaspektrometre sa svojimi oknami (ΔE) nastavujú zvyčajne na hodnoty 1,37 až 1,57 MeV (n_1), 1,66 až 1,86 MeV (n_2) a 2,41 až 2,81 MeV (n_3) (obr. 13).



Obr. 13 Schéma stanovenia K, U a Th gamaspektrometriou v teréne: a) prahový gamaspektrometer, b) diferenciálny gamaspektrometer (Mareš et al., 1990)

Početnosti impulzov n ($\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$) v troch vybraných oblastiach energie 1, 2, 3 závisia od koncentrácií (Q) K, U, Th podľa vzťahov (Mareš et al., 1990)

$$n_1 = a_1 Q_K + b_1 Q_U + c_1 Q_{Th},$$

$$n_2 = a_2 Q_K + b_2 Q_U + c_2 Q_{Th},$$

$$n_3 = a_3 Q_K + b_3 Q_U + c_3 Q_{Th},$$

kde a_i , b_i , c_i sú citlivosti prístroja vyjadrujúce početnosti impulzov v danej oblasti energie od jednotkovej koncentrácie príslušného prvku.

Konštanty a_1 , ..., c_3 sa určujú ciachovaním gamaspektrometrov a umožňujú prevod meraných početností n_i ($\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$) na koncentrácie %K, ppm eU a ppm eTh.

Terénne gamaspektrometre sa ciachujú nad prirodzenými alebo umelými geologickými objektmi – štandardami (etalónmi). Tie musia spĺňať podmienky ekvivalencie s meranými objektmi v teréne s ohľadom na zloženie etalónu (Z_{ef}), blízke hodnoty koncentrácií rádioaktívnych prvkov, spektrum energie gama žiarenia, geometrický tvar a rozmery etalónu. Vhodnou formou umelých etalónov sú betónové valce. Prirodzené etalóny sú tri vhodne vybrané geologické štruktúry, každá so zvýšeným obsahom jedného z prvkov K, U a Th.

Pri meraní sa spolu s účinkami K, U, Th deteguje v jednotlivých oknách energie pozadie, ktoré je potrebné pred spracovaním odpočítať.

Pri ciachovaní sa z meraní nad 3 etalónmi v oblastiach energie 1, 2, 3 namerajú hodnoty n_i , hodnoty Q_j sú známe a konštanty $a_1, \dots, c_3$ sa určia riešením sústavy rovníc.

Pri meraní v teréne sa v oblastiach energie 1, 2, 3 namerajú hodnoty n_i , konštanty $a_1, \dots, c_3$ sú známe a koncentrácie prvkov Q_j sa určia riešením sústavy rovníc.

2.2.1.7 Rušivé vplyvy pri gama prieskume

Koncentrácia rádioaktívneho prvku v pôde (hornine) meraná pri gama prieskume je jeho priemernou koncentráciou v objeme materiálu, ktorý je detegovaný detektorom.

V dôsledku najrozmanitejších vplyvov pri gama prieskume sa koncentrácie rádioaktívnych prvkov zistené pri gamaspektrometrických prieskumoch viac alebo menej líšia od skutočných hodnôt koncentrácií a preto by ich bolo vhodné považovať za „zdanlivé“ koncentrácie rádioaktívnych prvkov. Podobný prístup sa uplatňuje aj pri meraniach celkovej gama aktivity, kde sa preto uprednostňuje vyjadrovanie v jednotkách koncentrácie rádioaktívnych prvkov Ur (IAEA-TRS-186, 1979).

Základnou príčinou týchto nezrovnalostí je odlišnosť prieskumných podmienok a podmienok počas kalibrácie prístroja. Ak boli kalibračné merania realizované v podmienkach rovinatej a homogénnej geometrie (betónové kalibračné štandardy alebo kalibračné testovacie profily), rozdiely medzi skutočnými a zdanlivými koncentraciami rádioaktívnych prvkov môžu byť spôsobené viacerými faktormi:

- vplyv zloženia matrixu horniny,

- existencia, resp. neexistencia rádioaktívnej rovnováhy v hornine,
- vplyv pokrývných útvarov a vertikálnej distribúcie rádioaktívnych prvkov v nich,
- vplyv vlhkosti pôdy a horniny,
- vplyv geometrie terénu,
- vplyv vegetačného pokryvu,
- vplyv atmosférického vzduchu a vzdušného radónu a
- vplyv inercie prístrojov a mŕtvej doby prístrojov.

Vplyv zloženia matrixu horniny

Ťažké prvky sú silnými absorbentmi gama žiarenia s nízkymi energiami pod 0,4 MeV. Z tohto dôvodu sú nízke hodnoty celkovej gama aktivity registrované nad horninami s vysokým obsahom takých minerálov ako je baryt a galenit. Taktiež odozva terénnych scintilačných detektorov na vysoko obohatenú U rudu je nelineárnou funkciou koncentrácie U, ktorá musí byť určená empiricky. V každom prípade, látkové zloženie kalibračných štandardov a meraných hornín by malo byť čo najzhodnejšie (IAEA-TRS-186, 1979).

Rádioaktívna rovnováha v hornine

Atómy uránu a tória izolované od okolia dostatočne dlhú dobu sú v stave rádioaktívnej rovnováhy so svojimi dcérskymi produktmi, ktoré sú gama žiaričmi. Tento stav znamená, že gama žiarenie od jednotkovej hmotnosti takého materiálu je priamou mierou koncentrácie uránu alebo tória.

Rovnováha rozpadového radu ^{238}U

Najsilnejšie gama žiariče v tomto rade, ^{214}Pb a ^{214}Bi , vznikajú až rozpadom ^{222}Rn (obr. 1). Radón je vzácny plyn a predstavuje hlavný zdroj nerovnováhy v rade ^{238}U , pretože jeho polčas rozpadu 3,82 dňa je dostatočne dlhý na uskutočnenie migrácie na značnú vzdialenosť od svojho zdroja. Koeficient emanácie horniny je najmenší, ak atómy U sú situované uprostred veľkých nezvetraných kryštálov primárnych U minerálov ako je napr. uraninit. Naopak, jemnozrnný práškový materiál alebo materiál obsahujúci U vo forme viazanej disperzie, môžu uvoľniť veľkú časť vzniknutého radónu. Úbytok radónu z hermeticky uzavretého materiálu je doplnený rozpadom materského ^{226}Ra za 3 – 4 týždne. Pretože v ^{238}U rade je pred ^{214}Pb

a ^{214}Bi veľmi málo gama žiaričov (obr. 1), gama žiarenie uzavretého zdroja je primárne mierou obsahu rádia v zdroji. Keďže doba polpremeny ^{226}Ra je cca 1600 rokov, bude zabezpečovať gama žiarenie ^{214}Pb a ^{214}Bi dlhú dobu, aj keď materský ^{238}U nebude prítomný v zdrojovom materiáli. Rádioaktívna nerovnováha, kedy je geologický materiál ochudobnený o U v porovnaní s Ra, je výsledkom prírodných vyluhovacích procesov spojených s cirkulujúcimi podzemnými vodami. Naopak, keďže medzi ^{238}U a ^{226}Ra sú dva nuklidy s veľmi dlhými dobami polpremeny (^{234}U a ^{230}Th) (obr. 1), sedimenty obsahujúce U vyzrážaný z roztokov za posledných niekoľko 100 000 rokov, sú ochudobnené o Ra (IAEA-TRS-309, 1989)

Rovnováha rozpadového radu ^{232}Th

Nerovnováha ^{232}Th radu je v prírode zriedkavejšia. Prvou príčinou je, že plyný dcérskeho produktu ^{220}Rn má polčas rozpadu iba cca 55 sekúnd a preto nemôže odmigrovať do veľkej vzdialenosti od zdroja v pórovom prostredí. Druhou príčinou je, že doby polpremeny dvoch najdlhšie žijúcich dcérskych produktov tória, ^{228}Ra (pred ^{228}Ac) a ^{228}Th (po ^{228}Ac) (obr. 1), sú 6,7 resp. 1,9 roka, takže čerstvo uložené tórium sa dostáva do rádioaktívnej rovnováhy so svojimi dcérskymi produktmi za cca 50 rokov (IAEA-TRS-309, 1989)

Neexistencia rádioaktívnej rovnováhy medzi rádioaktívnymi prvkami a ich rozpadovými produktmi v meranom objeme horniny vedie k určeniu ich nesprávnych koncentrácií. Platí to ako o hornine, tak aj o referenčných štandardoch.

Pokryvné útvary

10 cm mocná vrstva pôdy zoslabí gama signál z podložnej horniny 3-násobne. Letecký gama prieskum je v podstate prieskumom gama aktivity pôdy. Autochtónne pôdy si zachovávajú a odrážajú rádioizotopovú geológiu prieskumného územia (IAEA-TRS-186, 1979). Elúviá o mocnosti menšej ako 1,5 m majú distribúciu rádioaktívnych prvkov približne zhodnú s materskými podložnými horninami, obsahy K, U a Th sú mierne znížené. Koncentrácia U je približne 0,6-násobok hodnoty, K a Th sú približne rovné 0,8-násobku hodnoty koncentrácie v materskej hornine (Mareš et al., 1990).

Za určitých klimatických podmienok dochádza v pokryvných útvaroch k vzniku vertikálnej distribúcie rádioaktívnych prvkov. Tomuto vplyvu sú najmenej vystavené pokryvy v miernom klimatickom pásme, kde nedochádza ani k intenzívnemu preplachovaniu zrážkovou vodou nadol ani vzlínaniu podzemnej vody a tieto pokryvy najpresnejšie odpovedajú svojmu podložiu. V podmienkach horúceho a vlhkého tropického podnebia sú rádioaktívne prvky intenzívne preplachované a vyluhované do spodných horizontov, kým v horúcich arídnych oblastiach dochádza k ich výnosu vzlínaním do vrchných horizontov.

Oblasti s viatymi pieskami s mocnosťou nad 50 cm sú problematickými z hľadiska gama prieskumov. Výhodou oblastí s ustúpeným ľadovcovým zaľadením je, že poskytujú odkryté oblasti čerstvých hornín. Ich nevýhodou sú oblasti pokryté transportovanými ľadovcovými sedimentmi (till, recentné morske a jazerné sedimenty), ktoré sú schopné úplne odtieniť gama žiarenie podložných hornín. Záplavové oblasti a oblasti pokryté snehom a ľadom by nemali byť vyberané pre realizáciu gama prieskumu (IAEA-TRS-186, 1979).

Vlhkosť pôdy a horniny

Primárnym efektom vysokej pôdnej vlhkosti je zoslabovanie toku gama žiarenia z pôdy. Voda obsahuje viac elektrónov pripadajúcich na jednotkovú hmotnosť ako suchá hornina a je preto účinnejšia v pohlcovaní gama žiarenia. Medzi tokom gama žiarenia zo suchej pôdy Φ_d a z vlhkej pôdy Φ_w o vlhkosti w [%] platí vzťah (IAEA-TRS-309, 1989)

$$\Phi_d = \Phi_w (1 + 1,11 \cdot w)$$

Koncentrácie rádioaktívnych prvkov stanovené pri povrchových alebo leteckých meraniach nebudú adekvátne, ak sa líši vlhkosť pôdneho materiálu a kalibračného štandardu.

Na druhej strane, exhalácia ^{222}Rn do atmosféry je výrazne znižovaná prevlhčeným alebo zmrznutým najvrchnejším pôdnym horizontom. Tento extra príspevok gama žiarenia od dcérskych produktov radónu, ktoré sú gama žiaričmi, v tesnej blízkosti povrchu vyvažuje pohltený tok gama žiarenia z hlbších horizontov pôdy (IAEA-TRS-186, 1979).

Geometria terénu

Prístroje kalibrované v rovinnej 2π geometrii neposkytujú presné výsledky v členitom teréne. V oblasti päty strmého horského svahu môže priestorový uhol detekcie dosiahnuť hodnotu do 3π – čím sú zistené koncentrácie rádioaktívnych prvkov nadhodnotené (vyššie) asi o 50 %. Aj v prípade relatívne plochého terénu, požadovanú 2π geometriu merania je možné získať iba nad rozsiahlymi a homogénnymi zdrojmi. Zdroje gama žiarenia, ako sú napr. východy a odkryvy uránových rúd, sú zvyčajne príliš malé na to, aby bolo možné určiť veľkosť U zrudnenia v 2π geometrii (IAEA-TRS-186, 1979).

Vegetačný pokryv

Lesy spôsobujú tienenie gama žiarenia hornín a pôd až do 35 % hodnoty nad tými istými horninami bez lesného porastu (Mareš et al., 1990). Nad husto lesmi porastenými oblasťami sú odporúčané testovacie merania, či získaný signál je dostatočný a mohol by byť využitý.

Atmosféricky vzduch a vzdušný radón

Gama žiarenie z hornín musí prejsť na ceste do detektora určitú cestu cez atmosféricky vzduch, s ktorým interaguje a dochádza k jeho pohlteniu a zoslabeniu. Toto zoslabenie je možné popísať rovnicou (IAEA-TRS-323, 1991)

$$N_h = N_0 \cdot e^{-\mu h},$$

kde N_h je početnosť impulzov vo výške detektora h [m] nad terénom,

N_0 je početnosť impulzov na úrovni terénu $h = 0$ m,

h je výška detektora nad terénom,

μ je koeficient zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu [m^{-1}].

Typickou hodnotou koeficientu μ je približne $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (IAEA-TRS-174, 1976). V procese kalibrácie leteckej aparatury sa jeho hodnoty upresňujú. Tab. 17 podáva odporúčané hodnoty μ pre letecké merania celkovej gama aktivity. Tab. 18 podáva približné hodnoty μ pre letecké gamaspektrometrické merania. Z tabuliek

vyplýva, že hodnoty koeficientu zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu sa líšia aj pre jednotlivé rádioizotopy – pre U a Th gama žiarenie sú vyššie, pre K nižšie, a tiež jeho hodnoty klesajú s rastúcou výškou letu.

Tab. 17 Koeficienty zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu normalizované na hustotu vzduchu $1,293 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ pre letecké aparatury na meranie celkovej gama aktivity (IAEA-TECDOC-186, 1979)

$\mu \times 10^3 \text{ m}^{-1}$			
Meraný rádioizotop			Odporúčaná hodnota
Draslík	Urán	Tórium	
6,4	7,7	7,5	7,0

Tab. 18 Približné hodnoty koeficientu zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu vzťahnuté na hustotu vzduchu $1,293 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ pre letecké gamaspektrometrické aparatury (IAEA-TECDOC-186, 1979)

Okno meranej energie gama žiarenia	$\mu \times 10^3 \text{ m}^{-1}$	
	Výška letu 50 m	Výška letu 125 m
Tórium	9	7,5
Urán	10,5	8,5
Draslík	12	9,5
Celková gama	9	7

Variácie pozadia spôsobené kozmickým žiarením získavajú na dôležitosť v prípade, keď sa nadmorské výšky prieskumnej lokality a kalibračnej základne líšia o niekoľko stoviek metrov.

V prípade variácií atmosférickej rádioaktivity v dôsledku zmien obsahu rozpadových produktov radónu v atmosférickom vzduchu by mali byť na namerané údaje vždy aplikované opravy.

Opravy na variácie kozmického žiarenia a žiarenia vzdušného radónu sú neoddeliteľnou zložkou procesu opravy nameraných údajov leteckého gama prieskumu.

Inercia prístrojov a mŕtva doba prístrojov

Inercia rádiometrov s integračným obvodom RC spôsobuje pri spojitkej registrácii meraných hodnôt zníženie amplitúd anomálií a ich posun v smere pohybu detektora. Vzťah medzi skutočným poľom I_s a zapísaným poľom I_z je (Mareš et al., 1990)

$$I_s = I_z + RC \cdot (dI_z / dt) = I_z + v \cdot RC \cdot (dI_z / dx),$$

kde v je rýchlosť pohybu detektora, t je čas a x dráha.

Moderné letecké scintilačné detektory sú schopné snímkovať každú sekundu a nie je potrebné uvažovať opravu na posun nameraných údajov.

Poznať hodnotu mŕtvej doby používaného prístroja a realizovať príslušnú opravu nameraných údajov je nevyhnutné najmä v prípadoch vysokých početností impulzov, ktoré môžu byť výrazne skreslené.

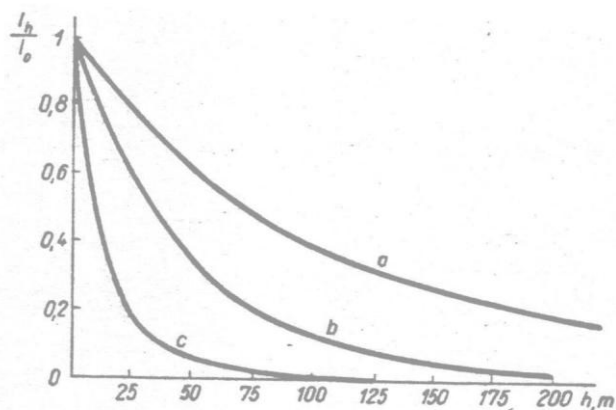
2.2.2 Letecký gama prieskum (aerogamaprieskum)

Letecký gama prieskum je založený na registrácii gama žiarenia hornín zo vzduchu pomocou meracieho zariadenia umiestneného na lietadle alebo vrtuľníku. Tento spôsob merania umožňuje prieskum rozsiahleho územia v relatívne krátkom čase, čím je veľmi efektívny a primárne sa uplatňuje v prvotnej prieskumnej fáze skúmanej oblasti. Okrem klasického zamerania na vyhľadávanie rudných telies a litologické mapovanie používa sa aj na riešenie environmentálnych úloh spojených napr. s upresňovaním radónového potenciálu alebo mapovaním rádioaktívneho spádu jadrových havárií. V ostatných rokoch sa využíva aj na účely mapovania pôd, úbytku podzemnej vody a salinity.

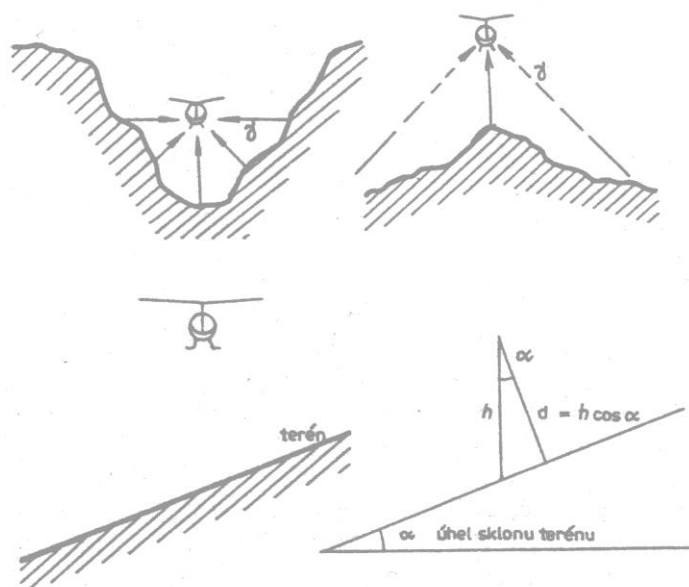
Intenzita gama žiarenia hornín klesá s výškou v závislosti od veľkosti plochy povrchového zdroja žiarenia (obr. 14). Anomálne zdroje o malých plochách sú ťažšie lokalizovateľné ako veľké plochy s podstatne nižšou koncentráciou rádioaktívnych prvkov. Posunutie leteckého profilu od stredu anomálnej plochy podmieňuje pokles registrovanej hodnoty. Spektrum energie gama žiarenia pozemných zdrojov je dobre rozlíšiteľné do výšky 150 m (Mareš et al., 1990).

Rovnako geometrické podmienky merania v členitom teréne ovplyvňujú merané hodnoty. Pri lete nad negatívnymi tvarmi terénu sú merané zvýšené hodnoty,

nad pozitívnymi tvarmi terénu znížené hodnoty gama aktivity hornín. Pri lete nad úbočím neodpovedá údaj rádiovýškomeru h skutočnej vzdialenosti d detektora od terénu, čo vedie k výpočtu zvýšených hodnôt poľa (obr. 15). Rozdiely hodnôt podmienené reliéfom sú až prvé desiatky percent (Mareš et al., 1990).



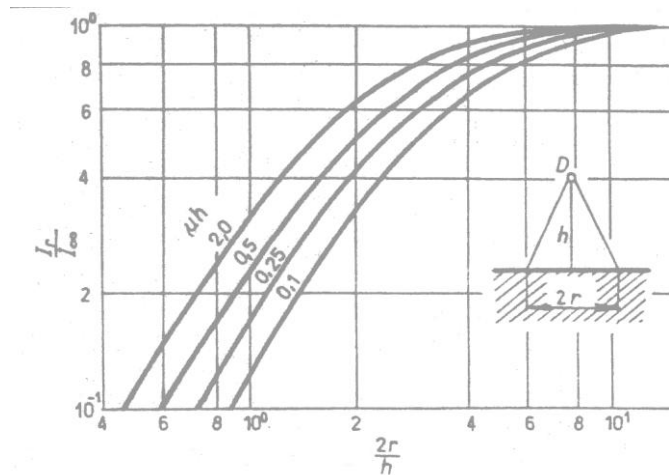
Obr. 14 Úbytok poľa gama aktivity povrchových zdrojov žiarenia s výškou (a – nekonečná plocha, b – plocha 100 x 200 m, c – plocha 20 x 60 m) (Mareš et al., 1990; Mašín, Válek, 1963)



Obr. 15 Vplyv tvaru povrchu Zeme na výsledky leteckých meraní rádioaktivity hornín (Mareš et al., 1990)

Lesy tienia gama žiarenie hornín až do 35 %.

Šírkový dosah leteckého merania je zvyčajne vzťahovaný na priemer kruhovej plochy, ktorá pre danú výšku detekcie produkuje 90 % detegovaného gama žiarenia (obr. 16). Šírkový dosah závisí od energie E_0 gama kvánt zdroja. Hodnoty lineárneho koeficientu zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu μ pre hustotu vzduchu $\rho = 0,00129 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ uvádzajú tabuľky č. 17 a 18 v podkapitole 2.2.1.7.



Obr. 16 Príspevok gama žiarenia časti nekonečného polpriestoru vo výške h ($2r$ – priemer valcovitého telesa, μ - lineárny koeficient zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu, $\mu = f(E_0)$) (Kogan et al., 1969 in Mareš et al., 1990)

Tvar poľa gama aktivity lokálneho pozemného zdroja o anomálnej koncentrácii rádioaktívnych prvkov sa mení s výškou. Amplitúda anomálie s výškou klesá a jej šírka rastie podľa vzťahu (Mareš et al., 1990)

$$x_{1/2} = 1,48 h,$$

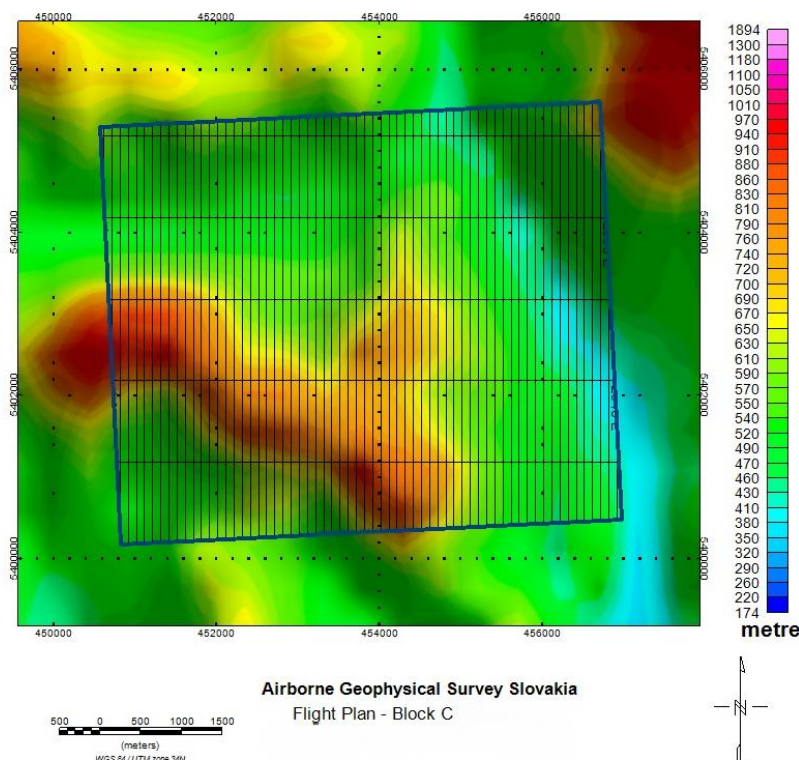
kde $x_{1/2}$ je šírka anomálie v polovičnej amplitúde maxima,
 h je výška merania.

Hodnota pozadia sa určuje meraním nad vodnou plochou s hĺbkou vody minimálne 2 m a vo vzdialenosti od brehov 400 m vo výške plánovanej pre letecké meranie. Takto stanovená hodnota pozadia zahŕňa účinky $I_{VP} + I_{KZ} + I_{Rn}$.

Aerogama prieskum sa realizuje pomocou lietadiel alebo vrtuľníkov zvyčajne v mierkach 1:100 000 až 1:10 000, v rovinatých terénoch v rovnobežnej sieti profilov, v členitom teréne metódou vrstevnicového lietania. Vzdialenosť meracích profilov (flight lines) od seba závisí od účelu merania. Pri detailných prieskumoch pre účely geologického a environmentálneho mapovania sú meracie profily od seba zvyčajne vzdialené 50 až 400 m, pri veľmi detailných prieskumoch, napr. pre účely mapovania kvality pôd alebo nebezpečných skládok, môže vzdialenosť klesnúť až na 10 m. Na tieto účely je merania vhodnejšie realizovať vrtuľníkom, rovnako ako merania v členitom teréne, či už po paralelných profiloch alebo po vrstevniciach. Pri regionálnych prieskumoch veľkých oblastí pre účely mapovania základných geochemických charakteristík sú meracie profily vzdialené 1 km a viac a uprednostňujú sa viac najmä dvojmotorové lietadla. Okrem systému paralelných meracích profilov (flight lines) sa realizujú aj dopĺňajúce merania po profiloch kolmých na meracie profily, tzv. preväzovacích profiloch (tie lines), ktorých vzdialenosti medzi sebou sú asi 5-násobkom vzdialenosti medzi meracími profilmi. Vo všeobecnosti sú vzdialenosti medzi profilmi kompromisom medzi požadovanou hustotou údajov a nákladmi na prieskum (obr. 17).

Výška letu nad povrchom zvyčajne závisí od vzdialenosti profilov, ale je limitovaná podmienkami bezpečnosti. Letecké prieskumy rádioaktivity sa zvyčajne realizujú v konštantnej (nominálnej) výške nad povrchom, a to v rozmedzí 30 až 200 m (pri veľmi detailných prieskumoch pre environmentálne účely až do 10 m nad povrchom), pričom u vrtuľníkov sú bezpečné výšky letu podstatne nižšie ako u lietadiel. Odchýlky od nominálnej výšky závisia od topografie terénu a schopností pilota.

Rýchlosť prieskumného letu u lietadla je v rozmedzí $50 - 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($180 - 216 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), u vrtuľníka $25 - 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($90 - 108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Keďže letecké rádiometrické systémy sú schopné realizovať meranie každú sekundu, je krok merania na profile daný rýchlosťou letu. Existuje tak trvalý kompromis medzi meranými početnosťami impulzov (a tým presnosťou merania) a frekvenciou merania, rýchlosťou letu a plošnou hustotou údajov.



Obr. 17 Príklad plánovaného systému prieskumných profilov

Základnou aparátúrou pre letecké rádiometrické merania je buď letecká aparátúra na meranie celkovej gama aktivity alebo letecká gamaspektrometrická aparátúra.

K doplnkovému prístrojovému vybaveniu patrí GPS navigácia, radarový výškomer, barometer, termometer, hygrometer a videokamera. Moderná GPS navigácia je nevyhnutná ako pre presnú navigáciu pilota po naplánovaných profiloch, tak aj pre lokalizáciu (x, y, z) každej nameranej hodnoty rádioaktivity. Navigácia diferenciálnym GPS systémom v reálnom čase dosahuje presnosť do ± 5 m. Radarový výškomer monitoruje veľmi presne výšku detektora rádioaktivity nad povrchom terénu, čím slúži ako pilotovi na navigáciu v bezpečnej výške, tak aj na opravu nameraných početností impulzov na zoslabenie vo vrstve atmosférického vzduchu. Presnosť radarového výškomera je na úrovni 2 % (IAEA-TECDOC-1363, 2003). Na ten istý účel slúži aj meranie barometrického tlaku, teploty a vlhkosti, nakoľko je nimi ovplyvnená hustota vzduchu a tým jeho schopnosť zoslabovania gama žiarenia. Údaje GPS, radaru, tlaku, teploty a vlhkosti sa registrujú spolu s meranými hodnotami rádioaktivity každú sekundu, prípadne s vyššou frekvenciou.

Videozáznam terénu pozdĺž trasy letu pomocou videokamery umiestnenej na spodku lietadla/vrtuľníka slúži pri kontrole pozície a interpretácii nameraných údajov.

Digitálnu registráciu meraných hodnôt geofyzikálnych polí ako aj navigačných a doplnkových prístrojov ako aj riadenie všetkých procesov počas prieskumného letu zabezpečuje centrálna jednotka leteckého geofyzikálneho systému (obr. 18) založená na báze PC so širokými možnosťami modulárnych hardvérových a softvérových doplnkov. Jadro tvorí výkonný procesor, na zobrazovanie údajov počas letu slúži LCD dotykový displej a široké možnosti ukladania údajov poskytuje interný pevný disk, SSD disk alebo prenosné pamäťové média. Centrálna jednotka leteckého systému slúži hlavne na:

- kontrolu systému a jeho sledovanie,
- registráciu meraných údajov (úloha registrátora),
- spracovanie meraných údajov v reálnom čase,
- spracovanie údajov navigácie,
- prehrávanie a analýza nameraných údajov po skončení letu.



Obr. 18 Centrálna jednotka leteckého geofyzikálneho systému (Pico Envirotec AGIS)

Letecké merania rádioaktivity hornín sa zvyčajne realizujú spoločne s paralelným meraním magnetického poľa Zeme.

2.2.2.1 Letecké meranie celkovej gama aktivity

Letecké meranie celkovej gama aktivity hornín podáva základnú informáciu o rádioaktivite hornín a v oblastiach so známou a jednoduchou geologickou stavbou môže byť postačujúcou vyhľadávacou metódou.

Letecká aparátúra na meranie celkovej gama aktivity sa skladá z detektora, bloku úprav a spracovania impulzov a registrátora.

Ako detektor sa používajú scintilačné kryštály NaI(Tl) o objeme niekoľkých tisícov cm^3 . Na meranie sa prevažne používajú merače strednej počtynosti impulzov na báze RC obvodov ($RC < 1 \text{ s}$) s diskriminačnou úrovňou energie v intervale 0,05 – 0,40 MeV, hodnotou mŕtvej doby rádovo $10^{-5} - 10^{-6} \text{ s}$ a citlivosťou minimálne $100 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$ na 1 Ur (IAEA-TRS-174, 1976).

Samotnému prieskumu predchádzajú dôležité operačné procedúry, ktorých výsledky platia pre použitú aparátúru a pre danú prieskumnú úlohu, príp. sezónu. Pri výmene akejkoľvek súčasti aparátúry je potrebné tieto procedúry opakovať. Ide o dôsledné nastavenie a kontrolu funkčnosti prístrojov, ciachovanie, určenie pozadia a koeficientu výškového zoslabenia gama žiarenia. Letecké aparátúry sa ciachujú letmi nad ciachovacím profilom o známej hodnote ekvivalentnej koncentrácii U v nominálnej výške prieskumu. Ciachovací profil by mal mať čo najhomogénnejšie pole rádioaktivity a čo najplochejší reliéf v páse o dĺžke minimálne 3 km a šírke minimálne 1 km. Celý ciachovací profil musí byť detailne zmeraný kalibrovaným prenosným rádiometrom v odporúčaných jednotkách celkovej gama aktivity (napr. jednotkách Ur), aby bolo možné následne na tieto jednotky prepočítvať výsledky leteckých meraní celkovej gama aktivity. Výsledkom ciachovania je hodnota citlivosti aparátúry v $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$ od 1 Ur. Je veľmi vhodné, ak je ciachovací profil v blízkosti rozsiahlej vodnej plochy, ktorá umožňuje stanovenie pozadia. Pozadie sa určuje letom nad rozsiahlou vodnou plochou (minimálne 3 km dlhou a 1 km širokou), čo najbližšie k prieskumnej lokalite. Pozadie v hlavnej miere zahŕňa vlastnú rádioaktivitu meracieho systému včítane lietadla, účinky atmosférického radónu a kozmického žiarenia. Koeficient zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu sa stanovuje experimentálne letmi vo viacerých výškach nad tým istým profilom nad homogénnou geologickou štruktúrou (môže byť ciachovací profil) a/alebo rozsiahlou vodnou plochou. Je odporúčané realizovať minimálne 5 letov, z toho 2 vo výškach pod

nominálnou výškou prieskumu a 2 nad ňou. Výsledkom riešenia exponenciálnej závislosti medzi registrovanými početnosťami impulzov a výškami letov nad povrchom je spresnenie približnej hodnoty ($7,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$) koeficienta zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu μ (tab. 17) (IAEA-TRS-174, 1976).

Denné operácie:

- príprava, kontrola a nastavenie aparatúry na základnom bode prieskumnej bázy (kontrola batérií a napájania, kontrola citlivosti pomocou malých a slabých gama žiaričov, kontrola rozsahov, kontrola časovej konštanty),

- let nad cca 5 km dlhým kontrolným profilom s členitým poľom rádioaktivity v nominálnej výške prieskumu,

- vlastné prieskumné meranie na meracích a priečných profiloch,

- let nad tým istým kontrolným profilom,

- kontrola aparatúry na základnom bode prieskumnej bázy.

Opakované merania na základnom bode bázy, kontrolného profilu, úsekov prieskumných profilov a merania priečných profilov umožňujú naviazanie výsledných hodnôt a zhodnotenie kvality merania a spôsobu spracovania údajov. Detailné meranie anomálií rádioaktivity zahŕňa overenie anomálie opakovaným meraním, zahustenie letových profilov a meranie v rôznych výškach. Doba jedného letu neprevyšuje 5 hodín.

Meranou hodnotou je početnosť impulzov v danej výške nad terénom $n(h)$ v $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$.

Spracovanie nameraných hodnôt:

- odčítanie pozadia: $n(h) - n_p(h) = n'(h)$,

- oprava na jednotnú výšku letu (nominálnu alebo na $h = 0 \text{ m}$). Pre plošne rozsiahle objekty ($r > 500 \text{ m}$) sa táto oprava zavedie podľa vzťahu (Mareš et al., 1990)

$$n' = n'(h) \cdot C(\Delta h),$$

kde $C(\Delta h)$ je násobný súčiniteľ zoslabenia gama žiarenia pre výškový rozdiel Δh medzi skutočnou výškou letu a nominálnou výškou výpočtu poľa (alebo $h = 0 \text{ m}$). Pre malé lokálne zdroje ($r < 400 \text{ m}$) sa používa vzťah (Mareš et al., 1990)

$$n_a' = n_a'(h) \cdot Q(RC, t_{1/2}) \cdot C_a(\Delta h, x_{1/2}),$$

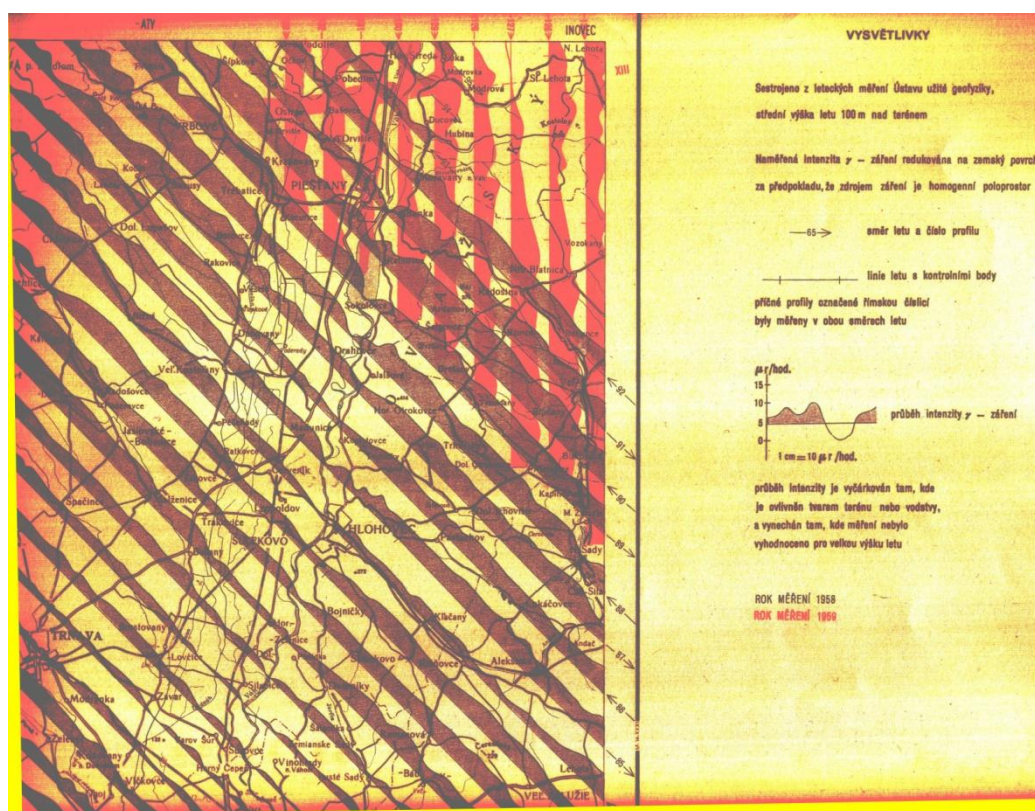
kde $Q(RC, t_{1/2})$ je oprava na inerciu rádiometra s časovou konštantou RC stanovená pomocou času $t_{1/2}$ (s) odpovedajúceho šírke anomálie v polovičnej amplitúde maxima a

$C_a(\Delta h, x_{1/2})$ je násobný súčiniteľ výškového zoslabenia pre anomáliu.

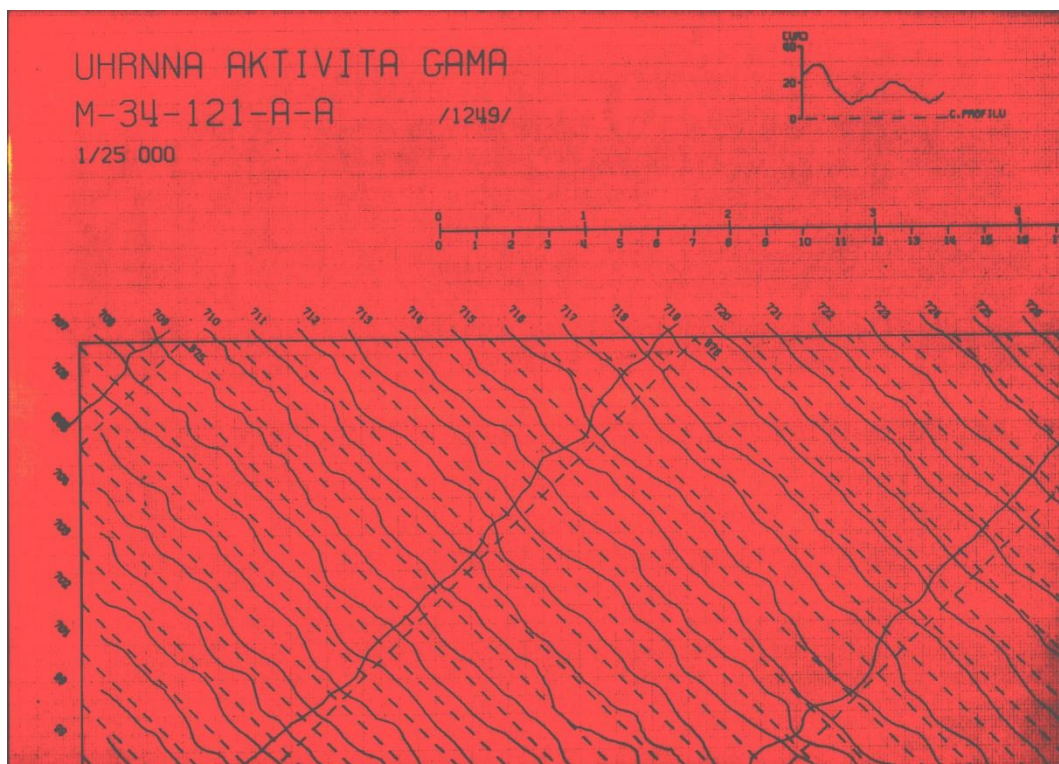
- prevod početností na výsledné jednotky určené spôsobom ciachovania aparatury (Ur , ppm eU, $Gy \cdot s^{-1}$, $A \cdot kg^{-1}$).

Zobrazovanie výsledkov:

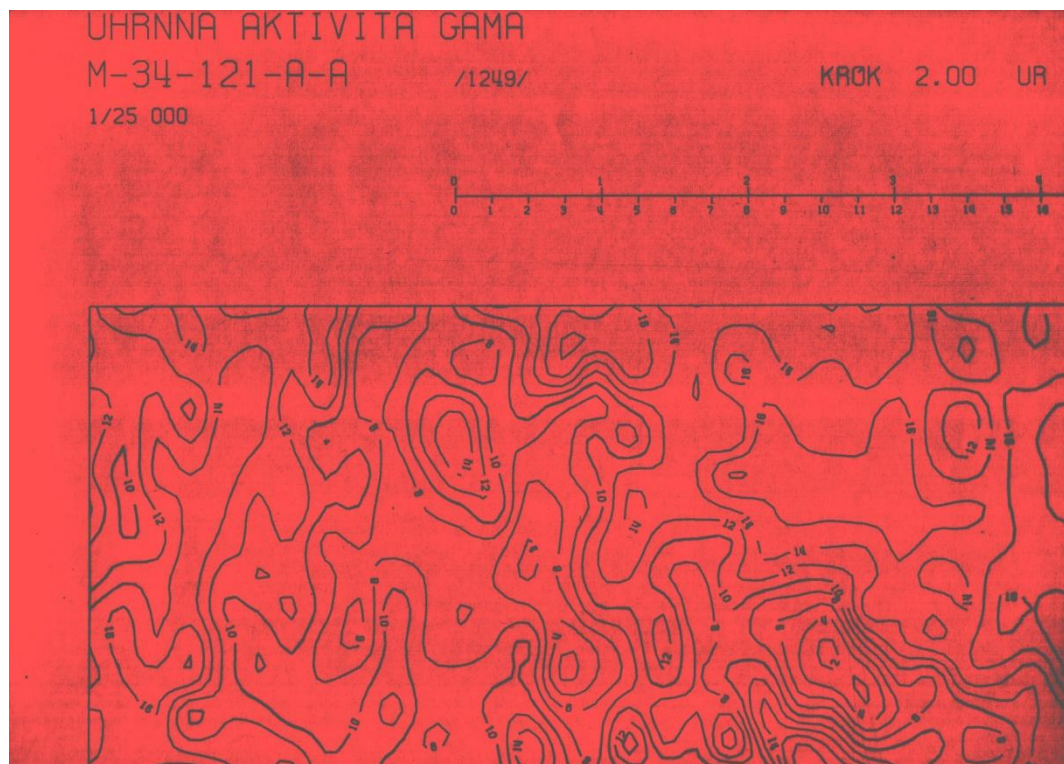
Výsledné hodnoty celkovej gama aktivity hornín sa znázorňujú ako mapy profilov (obr. 19a, b) alebo mapy izolínií (obr. 20) a kontúr. Z výsledkov meraní je možné stanoviť rozdiely rádioaktivity hornín $0,15 \text{ pA} \cdot \text{kg}^{-1}$ a 3 ppm eU (Mareš et al., 1990).



Obr. 19a Příklad mápy profilov starších meraní celkovej gama aktivity hornín



Obr. 19b Príklad mápy profilov starších meraní celkovej gama aktivity hornín



Obr. 20 Príklad mapy izolínií starších meraní celkovej gama aktivity hornín

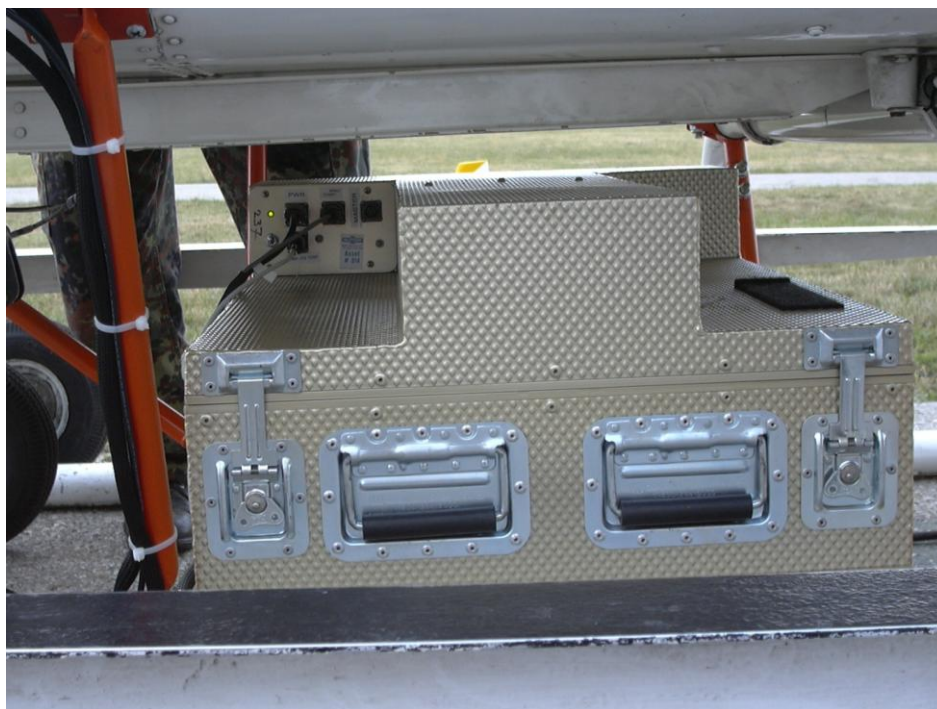
2.2.2.2 Letecké gamaspektrometrické meranie

Používajú sa na stanovenie obsahov K, U a Th v horninách pri vyhľadávaní rádioaktívnych i nerádioaktívnych surovín a geochemickom mapovaní.

Letecké spektrometre sa skladajú z detektora, jednotky stabilizácie zosilnenia impulzov, analyzátora impulzov, intervalometra a registrátora údajov.

Ako detektory sa najviac používajú kryštály NaI(Tl) valcovitého alebo hranolovitého tvaru o celkovom objeme 5 000 až 50 000 cm³. Moderné letecké spektrometrické systémy zvyčajne obsahujú detektor pozostávajúci minimálne z dvoch 16,8 l detektorových zostáv. Jedna zostava obsahuje štyri NaI(Tl) kryštály, každý o rozmeroch 10,2 cm x 10,2 cm x 40,6 cm (objem 4,2 l), v tepelne izolovanom kontajneri. Najcitlivejšie prieskumné systémy obsahujú až 12 kryštálov. Nad minimálne 4 základné kryštály, ktoré registrujú gama žiarenie prichádzajúce zdola od hornín (downward-looking detector), sa umiestňuje dodatočný kryštál (4,2 l), ktorý je takto do určitej miery tienený zdola a je určený na registráciu gama žiarenia prichádzajúceho zhora (upward-looking detector) (obr. 21). Jeho údaje sa používajú na určenie opravy na vzdušný radón. Každý NaI(Tl) kryštál má svoj fotonásobič.

Tepelná stabilizácia detektora a použitie nízkoaktívnych referenčných žiaričov ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁵⁷Co alebo ¹³³Ba umožňuje automatickému stabilizátoru spektra energií žiarenia zaistiť požadovanú proporcionalitu energie žiarenia a amplitúd získaných impulzov. Počítačom riadený analyzátor impulzov rozdeľuje impulzy od gama kvánt s energiami 0 – 3 MeV do 256, 512 alebo 1024 kanálov, pričom zvyčajne sumuje počty impulzov v 4 oknách (celková gama aktivita, K, U a Th). V dodatočnom okne (tzv. kozmickom) sa registruje gama žiarenie s energiou nad 3 MeV. Počty registrovaných impulzov v jednotlivých oknách v časových intervaloch (zvyčajne 1 s alebo menej) sa digitálne registrujú spolu s údajmi o pozícii lietadla (x, y), výške letu (GPS výška, radarová výška), teplote, vlhkosti a barometrickom tlaku v centrálnej jednotke. Grafický výstup dát na zobrazovacom paneli (LCD displej) centrálnej jednotky leteckého systému slúži na okamžitú orientáciu pri realizácii leteckých prác (obr. 22). Celkový pohľad na leteckú gamaspektrometrickú aparatúru podáva obr. 23.



Obr. 21 Teplotne izolovaný box detektora so 4 hlavnými NaI(Tl) kryštálmi (16,8 l) a 1 NaI(Tl) kryštálom (4,2 l) nad nimi, umiestnený v podvese vrtuľníka (letecký gamaspektrometer Pico Envirotec GRS410)



Obr. 22 LCD panel centrálnej jednotky leteckého systému Pico Envirotec AGIS



Obr. 23 Vrtuľník BELL 206 B s leteckým gamaspektrometrom Pico Envirotec GRS410 so 4+1 NaI(Tl) kryštálmi (21,0 l)

Najmodernejšie letecké gamaspektrometrické systémy používajú namiesto klasicky zaužívaných NaI(Tl) kryštálov, detektory na báze scintilačných materiálov BGO a CsI(Tl). Aj keď obidva materiály sú cenovo drahšie ako NaI(Tl), najmä použitie CsI(Tl) kvôli vyššej účinnosti registrácie gama kvánt a ďalším prednostiam, umožňuje nahradiť 16 l NaI(Tl) iba 4 l CsI(Tl), čo je významným prínosom z hľadiska zníženia hmotnosti leteckého meracieho systému (Koomans, R.L. et al., 2008).

Podobne ako v prípade leteckého merania celkovej gama aktivity, aj v prípade leteckej gamaspektrometrie je nevyhnutné realizovať pred samotným prieskumom množstvo operačných procedúr, z ktorých štyri najdôležitejšie sú: lety na určenie pozadia, ciachovanie nad pozemnými rádioaktívnymi štandardmi, ciachovacie lety nad ciachovacím profilom a lety na stanovenie príspevku od vzdušného radónu. Ďalšími procedúrami sú lety na kalibráciu radarového výškomera, kalibráciu

prevodníka barometrického tlaku a merania za účelom stanovenia mŕtvej doby meracieho systému.

Lety vo veľkých výškach na stanovenie pozadia

Zvyčajne sa realizujú nad pobrežnými morskými vodami, kde je v ovzduší málo radónu. Spektrá sa merajú a registrujú vo viacerých výškach – typicky 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 a 3,5 km nad hladinou. 15 minút súvislej registrácie na každej výškovej úrovni je dostatočné pre 33 l detektor. Údaje sú spracované vo výpočtovom pracovisku a výsledkom sú hodnoty pozadia lietadla a kozmického pozadia v každom meranom energetickom okne v početnosti impulzov ($\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$). Oprava o pozadie spočíva v ich odpočítaní od meraného spektra hornín.

Pozemné ciachovanie nad rádioaktívnymi štandardmi na ciachovacej základni

Zvyčajne sa používajú 4 mobilné betónové ciachovacie bloky s rozmermi 1m x 1m x 0,3m so známymi koncentraciami K, U a Th. Štvrtý blok je bez rádioaktívnych prvkov, tzv. nulový (pozaďový). Merací systém je namontovaný na lietadle/vrtuľníku a ciachovacie bloky sa zasúvajú pod neho na 10-minútové merania. Registrované spektrá sú počítačovo spracované a výsledkom sú hodnoty 4 stripping pomerov, ktoré sa prepočítajú na nominálnu výšku prieskumného letu a slúžia na opravu početností nameraných v každom energetickom okne na účinky ostatných rádioaktívnych prvkov v danom okne.

Lety nad ciachovacím profilom

Ciachovací profil je ľahko navigovateľný presne zameraný profil v krajine, 2 – 5 km dlhý a 0,6 km široký, ktorý sa používa na meranie odozvy leteckého gamaspektrometra na zmeny výšky detektora (koeficienty výškového zoslabenia gama žiarenia) a na zdroje o známych koncentráciách rádioaktívnych prvkov (koeficienty citlivosti). Realizujú sa lety v rôznych výškach nad povrchom – typicky v rozmedzí 60 až 240 m v 30 m intervaloch. Veľmi vhodné sú súčasne lety nad blízkou vodnou plochou (široká rieka, jazero alebo vodná nádrž) v tých istých výškach, ktoré slúžia na určenie pozadia. Registrované početnosti impulzov sa opravujú o pozadie a stripping pomery a použijú na výpočet koeficientov výškového zoslabenia v každom energetickom okne. Súčasne s letmi nad ciachovacím profilom sa realizujú pozemné merania na ciachovacom profile s kalibrovaným prenosným gamaspektrometrom v jednotkách koncentrácií rádioaktívnych prvkov K, U a Th. Porovnaním registrovaných početností impulzov leteckého gamaspektrometra s nameranými koncentraciami pozemného gamaspektrometra sa stanovujú

koeficienty citlivosti leteckého meracieho systému, ktoré budú použité pri prepočte početností registrovaných na prieskumnej lokalite na koncentrácie rádioaktívnych prvkov v povrchových horninách.

Lety na stanovenie pozadia (príspevku) od vzdušného radónu

Existujú 3 postupy na stanovenie a odstránenie pozadia od atmosférického radónu z nameraných údajov. Metódy „spectral-ratio“ a „full-spectrum“ využívajú údaje z multikanálového spektra gama žiarenia na stanovenie príspevku radónu. Tieto metódy nie je možné použiť na severnej pologuli, kde je značné znečistenie umelým ^{137}Cs (obr. 2). Treťou metódou je použitie „upward-looking“ detektora, tieneneho zdola, ktorý registruje údaje v okne energií. Všetky tri metódy vyžadujú dobrú kvalitu spektra registrovaného súvisle typicky 200 – 600 sekúnd letmi buď iba nad vodnou plochou alebo nad rozhraním vody a súše (IAEA-TECDOC-1363, 2003).

Letecké gamaspektrometre by mali prejsť úplným ciachovacím procesom každých 12 mesiacov. Častejšie ciachovanie je potrebné iba v prípade modifikácie aparatury, ktorá mohla viesť k zmene citlivosti systému alebo zmene rádioaktívneho pozadia lietadla. Ak sa početností impulzov v Th okne opravené o pozadie, získané meraním Th rádioaktívneho žiariča, líšia o viac ako 3 % od hodnôt pri poslednom ciachovaní, došlo k podstatnej zmene citlivosti systému a ciachovanie je potrebné opakovať (Grasty a Minty, 1995 in IAEA-TECDOC-1363, 2003).

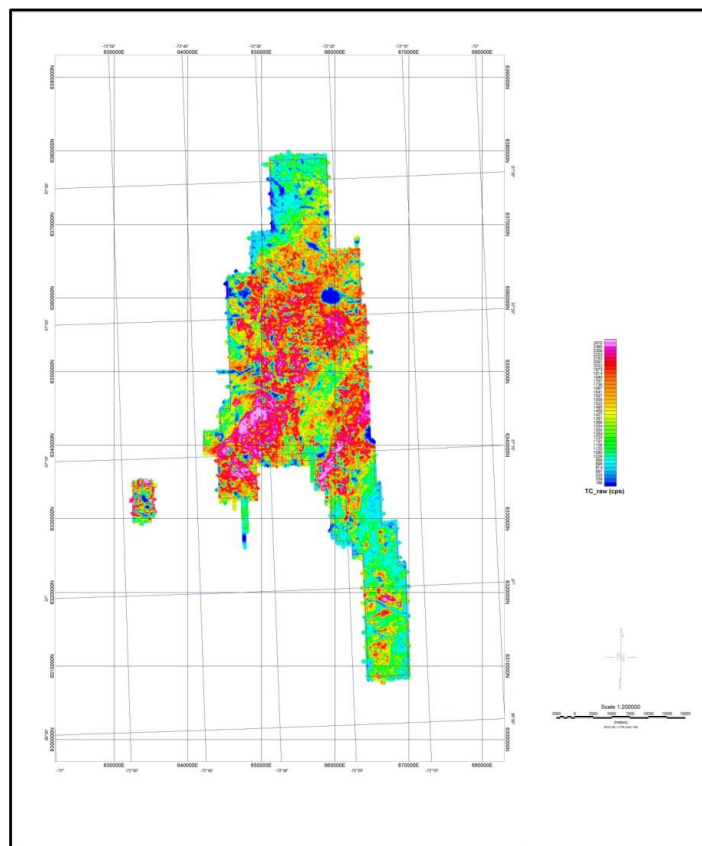
Denné operácie:

- príprava, kontrola a nastavenie aparatury na základnom bode prieskumnej bázy (kontrola batérií a napájania, kontrola citlivosti pomocou Th žiariča (povolené odchýlky do 5% od priemeru), kontrola rozlišovacej schopnosti na Th piky (do 7%), kontrola stability spektra na základe nominálnych pozícií K a Th pikov),
- let nad cca 8 km dlhým kontrolným profilom s členitým, ale stálym poľom rádioaktivity v nominálnej výške prieskumu (slúži na záverečnú kontrolu citlivosti systému, rádioaktivity lietadla a na monitorovanie účinkov zmien pôdnej vlhkosti v prieskumnej oblasti (odchýlky priemerných početností impulzov v Th okne do 10% od priemeru predchádzajúcich letov)) (IAEA-TECDOC-1363, 2003),
- vlastné prieskumné meranie na meracích a priečnych profiloch,
- let nad tým istým kontrolným profilom,
- kontrola aparatury na základnom bode prieskumnej bázy (detto ako ráno).

Opakované merania na základnom bode bázy, kontrolného profilu, úsekov prieskumných profilov a merania priečných profilov umožňujú naviazanie výsledných hodnôt a zhodnotenie kvality merania a spôsobu spracovania údajov. Detailné meranie anomálií rádioaktivity zahŕňa overenie anomálie opakovaným meraním, zahustenie letových profilov a meranie v rôznych výškach. Doba jedného letu neprevyšuje 5 hodín.

Meranou hodnotou je početnosť impulzov v danej výške nad terénom $n(h)$ v $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$.

Predbežné spracovanie všetkých veličín registrovaných centrálnou jednotkou sa realizuje výpočtovou technikou (notebooky, PC) z magnetických médií na terénnej operačnej báze priamo v prieskumnej oblasti (obr. 24). Štandardom v oblasti spracovateľského softvéru na tieto účely je produkt Oasis Montaj od firmy Geosoft.



Obr. 24 Príklad kontúrovej mapy surových nameraných údajov celkovej gama aktivity v $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1} = \text{cps}$

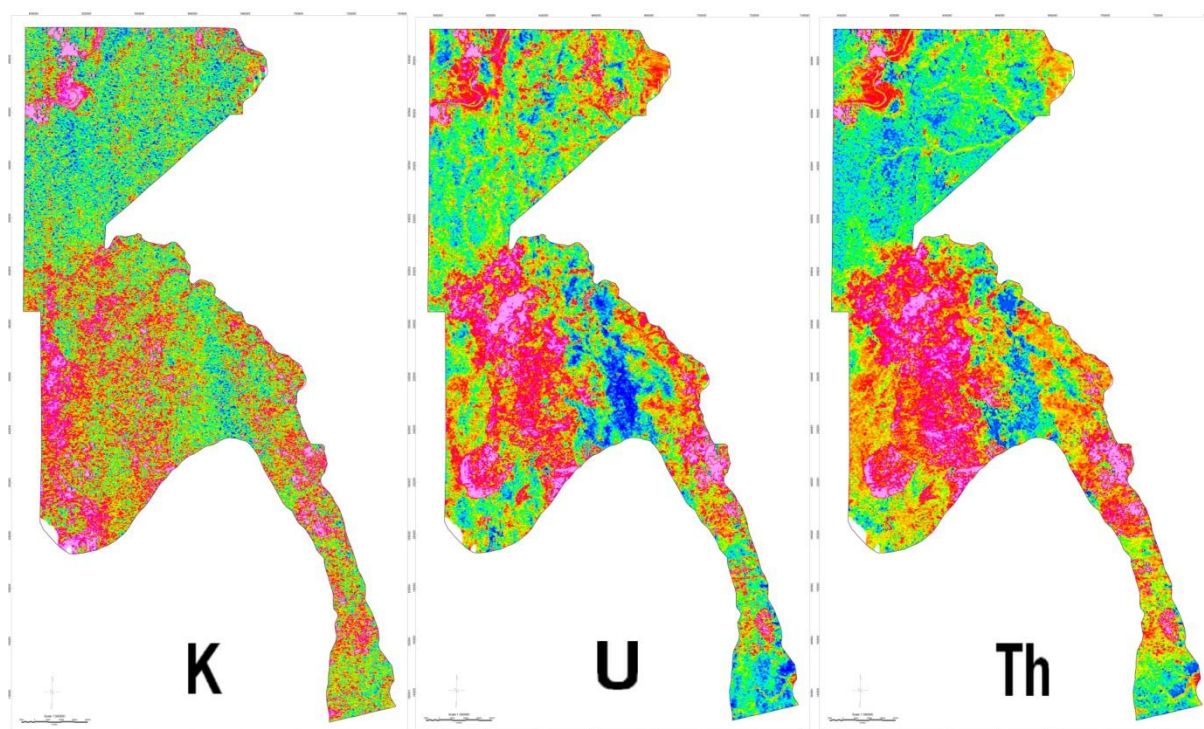
Spracovanie nameraných hodnôt:

- pre-processing - je podstatnou časťou procesu kontroly kvality nameraných údajov (napĺňanie databázy údajmi zo všetkých meracích komponentov aparatury, kontrola fyzikálnej zmysluplnosti registrovaných údajov, kontrola celistvosti údajov a kontrola na falošné hodnoty, prvotná filtrácia niektorých údajov (napr. radarovej výšky, kanálu kozmického žiarenia) na redukovanie štatistického šumu). Všetky originálne údaje namerané prístrojmi sú archivované pre potreby neskoršieho opakovaného spracovania.

- techniky spektrálneho vyhladzovania - slúžia na redukciiu šumu v spektrách gama žiarenia: NASVD metóda (Noise Adjusted Singular Value Decomposition) a MNF metóda (Maximum Noise Fraction),

- oprava na mŕtvu dobu prístroja,
- oprava na drift (posun) spektra energií gama žiarenia,
- oprava na kozmické pozadie a pozadie lietadla,
- oprava na pozadie vzdušného radónu (metódy „spectral-ratio“, „full-spectrum“ a „upward-looking detector“),
- oprava na interferenciu žiarenia (stripping pomery),
- oprava na výšku letu,
- prevod opravených početností impulzov na koncentrácie rádioaktívnych prvkov v horninách pomocou koeficientov citlivostí,
- vyrovnávanie (levelling) gamaspektrometrických údajov pomocou naviazania na priečne profily, pomocou medzikanálovej korelácie a pomocou smerovej filtrácie gridu (micro-levelling) (IAEA-TECDOC-1363, 2003).

Finálne spracovanie a vizualizácia výsledkov leteckej gamaspektrometrie vo forme máp profilov, máp izolínií alebo kontúrových máp (obr. 25) celkovej gama aktivity, koncentrácie K, U, Th alebo ich pomerov a vo forme histogramov sa realizuje mimo terénu v plnohodnotnom výpočtovom stredisku. Citlivosť metódy je 0,3% K, 1 ppm eU a 2 ppm eTh (Mareš et al., 1990).



Obr. 25 Ukážka finálnych kontúrových máp koncentrácie K, U a Th

2.2.3 Automobilový gama prieskum (autogamaprieskum)

Automobilový gama prieskum sa používa na prieskum rádioaktívnych surovín, geochemické mapovanie, prieskum nerádioaktívnych surovín a na overovanie anomálií zistených leteckým prieskumom. Používa sa väčšinou gamaspektrometrické meranie.

2.2.3.1 Automobilové gamaspektrometrické meranie

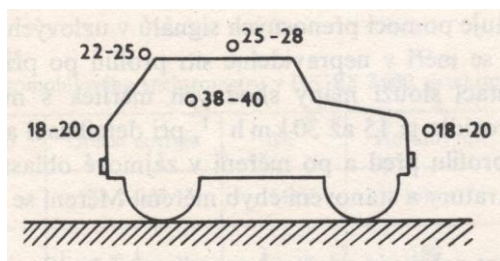
Vypĺňa medzeru medzi leteckým a peším prieskumom. Jeho výhodou oproti peším meraniam prenosnými prístrojmi je pokrytie väčšej plochy územia za ten istý čas a za rovnaké náklady a oproti leteckým meraniam rýchla príprava a realizácia a vyššia hustota údajov. Veľmi vhodné je jeho použitie na riešenie environmentálnych problémov (napr. mapovanie rádioaktívneho spádu, vyhľadávanie stratených rádioaktívnych žiaričov). Nevýhodou oproti pešiemu i leteckému prieskumu je možnosť realizácie iba v teréne priechodnom pre terénny automobil.

Historicky je automobilová aparátúra v podstate leteckou, len bola prispôsobená použitiu v automobile. Súčasní výrobcovia vyvíjajú ako systémy špecifické, iba pre použitie v autách, tak aj systémy použiteľné na viacerých platformách (automobil, vrtuľník, lietadlo). Ako detektor sa rovnako najviac používa scintilačný počítač s kryštálom NaI(Tl), menej tiež kryštál BGO a CsI(Tl). Objem kryštálu NaI(Tl) je menší ako u leteckého systému, zvyčajne viac ako 2 l, typicky 4 – 8 l. Ďalej aparátúra obsahuje blok úpravy, analýzy a spracovania impulzov buď analógovo (meradlo strednej početnosti impulzov) alebo digitálne (meranie v časových intervaloch Δt) s registráciou. Navigácia pomocou diferenciálneho GPS systému v spojení s GIS-mapovým displejom je štandardom a umožňuje voľbu trasy prieskumu v reálnom čase. Rovnako sú na monitore centrálnej jednotky systému zobrazované údaje o meranej hodnote radiácie a početnostiach alebo počtoch impulzov od jednotlivých rádioizotopov so zvukovou signalizáciou.

Terénne merania sa realizujú v mierkach 1:25 000 (vyhľadávanie, mapovanie) až 1:2 000 (detailizácia anomálií) a ich charakter závisí od účelu aplikácie. Pre účely geologického mapovania je vhodnejšie meranie mimo ciest, v pustatinách s prejazdným terénom v sieti rovnobežných profilov a v kultivovaných oblastiach v nepravidelnej sieti profilov po prírodných (neupravených) cestách. Pre účely environmentálnych aplikácií, kde sú už hodnoty pozadia zvyčajne známe, sa merania realizujú po cestách, nakoľko ide väčšinou o vyhľadávanie umelých rádioizotopov, ktorých žiarenie prevyšuje rádioaktivitu prírodného (alebo doterajšieho umelého) pozadia. V zimných podmienkach dostatočnej snehovej pokrývky je možné tieto systémy adaptovať na snežné skútre, čo umožňuje získať kvalitné údaje aj napriek zoslabeniu gama žiarenia v snehovej pokrývke. Rýchlosť terénneho vozidla je 15 – 30 km·h⁻¹, pri detailizácii anomálií 5 km·h⁻¹, čo je asi 1/5 až 1/10 rýchlosti leteckého merania. Prístrojové vybavenie umožňuje pri týchto rýchlostiach spojitú registráciu meraných hodnôt. V prípade potreby veľmi vysokej presnosti sú merania realizované zastavením vozidla na každom meracom bode na stanovený čas Δt . Hustota registrovaných údajov pozdĺž meranej trasy je väčšia ako u leteckého profilu a tvar nameraného poľa je podobnejší skôr pešiemu meraniu. Údaje sú náchylné na rôzne lokálne variácie „geologického šumu“ ako napr. zloženie pôdy, obsah pôdnej vlhkosti, povrchová voda (mláky), pomer transportovaného a in situ materiálu, zvetrávanie a odkryvy materských hornín. Nerovnosti terénu (topografia) v blízkosti trasy merania (úbočia, zárezy, svahy) majú značný vplyv na registrované hodnoty (až prvé desiatky

%) zvlášť tam, kde cesta križuje odkryté podložie. Výkyvy pozadia automobilového systému sú väčšie ako u leteckého, v dôsledku vnútorného a vonkajšieho znečistenia vozidla prachom, pieskom, blatom, atď..

Detektor automobilového systému sa umiestňuje podľa typu priechodnosti terénu vnútri alebo zvonka vozidla. Miestom jeho umiestnenia je dané jeho tienenie vozidlom (obr. 26). Výška detektora h_D podmieňuje jeho šírkový dosah $2r$ (tab. 19). Pri vyššom umiestnení detektora sa znižuje jeho citlivosť k lokálnym zdrojom žiarenia a priechodnosť vozidla terénom. Tieniaci účinok vozidla je pozitívom v prípade potreby odtienenia materiálu cesty. Taktiež je možné využiť tieniace účinky Pb dosky umiestnenej pod detektorom alebo hydraulické rameno umožňujúce meranie detektorom odkloneným nad susedný terén vo výške cca 3 m.



Obr. 26 Veľkosť tienenia detektora vozidlom (v %) (Mareš et al., 1990)

Tab. 19 Šírkový dosah automobilového gama detektora, $\mu_{ef}(\text{vzduch}) = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (Mareš et al., 1990)

h_D (m)	$2r_{80\%}$ (m)	$2r_{90\%}$ (m)
1,0	8	22
1,5	14	36
2,0	20	52

Pozadie autogamaspektrometra sa určuje meraním nad vodnou plochou minimálne 2 m hlbokou a minimálne 50 m od plochého brehu. Grasty a Cox (1997) in IAEA-TECDOC-1363 (2003) odporúčajú pripojenie automobilového detektora k prenosnému gamaspektrometru a tak meranie realizovať v číne.

Aparatúra sa ciachuje nad umelými betónovými rádioaktívnymi štandardmi na ciachovacej základni s rovnakým postupom ako u leteckých gamaspektrometrov.

Výsledkom je stanovenie stripping pomerov. Ako kontrola správnosti ich stanovenia slúži porovnanie výsledkov meraní na profile o známej koncentrácii K, U a Th s rovnakým usporiadaním aparatury aké je plánované pri prieskume.

Citlivosti systému sa určujú meraním v strede kruhu s priemerom 15 - 20 m, v ktorom boli pôdne koncentrácie rádioaktívnych prvkov určené ako priemer z gridu meraní ciachovaným prenosným gamaspektrometrom.

Denné operácie:

- príprava, kontrola a nastavenie aparatury na základnom bode prieskumnej bázy (kontrola batérií a napájania, kontrola citlivosti pomocou Th žiariča, kontrola rozlišovacej schopnosti na Th piky, kontrola stability spektra na základe nominálnych pozícií K a Th pikov),
- meranie kontrolného profilu so stálym poľom rádioaktivity, mimo ciest, v prieskumnom usporiadaní (slúži na záverečnú kontrolu citlivosti systému, rádioaktivity vozidla, na monitorovanie účinkov zmien pôdnej vlhkosti v prieskumnej oblasti a na stanovenie chýb merania),
- vlastné prieskumné meranie na profiloch a poľných cestách,
- meranie toho istého kontrolného profilu,
- kontrola aparatury na základnom bode prieskumnej bázy (detto ako ráno).

Merania sa opakujú v objeme 5-10 % prác.

Meranou hodnotou je početnosť impulzov v $\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$ alebo počet impulzov v určenom časovom intervale Δt .

Spracovanie nameraných hodnôt:

- pre-processing - je podstatnou časťou procesu kontroly kvality nameraných údajov (napĺňanie databázy údajmi zo všetkých meracích komponentov aparatury, kontrola fyzikálnej zmysluplnosti registrovaných údajov, kontrola celistvosti údajov a kontrola na falošné hodnoty, prvotná filtrácia niektorých údajov na redukovanie štatistického šumu). Všetky originálne údaje namerané prístrojmi sú archivované pre potreby neskoršieho opakovaného spracovania.
- oprava na mŕtvu dobu prístroja,
- oprava na drift (posun) spektra energií gama žiarenia,

- oprava na pozadie – odčítanie spektra pozadia určeného z denných meraní kontrolného profilu,
- oprava na interferenciu žiarenia (stripping pomery) bez opravy na výšku detektora,
- prevod opravených početností impulzov na koncentrácie rádioaktívnych prvkov v horninách pomocou koeficientov citlivostí,
- vyrovňovanie (levelling) gamaspektrometrických údajov (IAEA-TECDOC-1363, 2003).

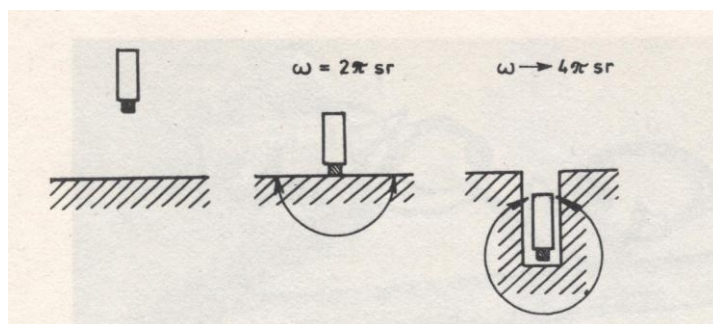
Výsledky automobilovej gamaspektrometrie sa zobrazujú vo forme máp profilov, máp izolínií alebo kontúrových máp celkovej gama aktivity, koncentrácie K, U, Th alebo ich pomerov a vo forme histogramov. Merania realizované po cestách sú zvyčajne vo veľmi nepravidelnej sieti. Príprava gridov pre mapy izolínií a kontúr vyžaduje preto dobré znalosti parametrov gridovania a výber vhodného gridovacieho algoritmu. Vo veľmi riedkej a nepravidelnej sieti merania je preto vhodné zobrazovať výsledky vo forme grafickej alebo farebnej stupnice pozdĺž trasy merania.

2.2.4 Peší gama prieskum

Peší gama prieskum sa používa ako vyhľadávacia, prieskumná a detailizačná metóda na plošne obmedzených územiach na účely uránovej prospekcie, geologického mapovania a environmentálnych štúdií.

Podľa geometrických podmienok sa meranie delí na meranie povrchové ($\omega = 2\pi$ sr) a v jamkách ($\omega \rightarrow 4\pi$ sr). Citlivosť metódy rastie s priestorovým uhlom žiarenia (obr. 27). Pri meraní v jamkách 0,3 až 0,6 m hlbokých sa znižuje nepriaznivý účinok rádioaktívneho spádu.

Meraná zóna závisí od výšky detektora nad terénom (tab. 20). Hmota m analyzovanej horniny a efektívny rádius r odpovedajúci 90 % žiarenia nekonečného polpriestoru sú závislé od detegovanej energie žiarenia (tab. 21).



Obr. 27 Geometrické podmienky merania prenosnými rádiometrami (Mareš et al., 1990)

Tab. 20 Šírkový dosah prenosného rádiometra, $\mu_{\text{ef}} (\text{vzduch}) = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (Mareš et al., 1990)

h_D (m)	$2r_{80\%}$ (m)	$2r_{90\%}$ (m)
0,02	0,2	0,4
0,04	0,4	0,8
0,15	1,5	3,0

Tab. 21 Hodnoty r a m pre horniny s hustotou $\rho = 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $h_D = 0 \text{ m}$ (Mareš et al., 1990)

E_0 (MeV)	r (cm)		m (kg)	
	prim.	prim. + rozpt.	prim.	prim. + rozpt.
0,25	11,4	20,4	6	36
0,50	14,9	23,8	14	60
1,00	20,3	28,4	34	100
2,00	26,6	38,4	79	230
3,00	35,2	45,2	182	380

Pri povrchovom meraní sa detektor umiestňuje priamo na zemský povrch alebo do malej, ale konštantnej výšky nad povrch. Meranie nad povrchom minimalizuje vplyvy lokálnych nerovností terénu a lokálnej nehomogénnej distribúcie rádioaktívnych prvkov. Je nevyhnutné, aby boli dodržané jednotné geometrické podmienky merania na všetkých meracích bodoch v zhode s podmienkami ciachovania.

Rekognoskačným meraním na odkryvoch hornín alebo v nepravidelnej sieti sa získavajú základné údaje o rádioaktivite hornín územia. Vyhľadávací a mapovací prieskum sa realizuje v mierkach 1:25 000 až 1:5 000, detailizácia anomálií v mierke 1:500 na paralelne vytýčených profiloch. Vzdialenosť bodov merania na profile (krok merania) je 1 – 50 m.

2.2.4.1 Meranie celkovej gama aktivity prenosnými rádiometrami

Je to základná metóda štúdia rádioaktivity hornín v teréne.

Poľný prenosný rádiometer na meranie celkovej gama aktivity sa skladá z detektora, bloku úpravy impulzov a výstupného meradla. Hmotnosť prístroja je 0,5 – 4 kg. Detektormi sú najčastejšie scintilačné počítače s kryštálmi NaI(Tl) o rozmeroch 30 x 20 mm až 50 x 50 mm. Meradla strednej početnosti impulzov s časovými konštantami RC 0,5 – 20 s umožňujú odčítanie výsledkov v $\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$. Digitálne prístroje poskytujú počet impulzov za predvolený čas merania. Citlivosť prenosných rádiometrov je 1 – 8 $\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$ na 1 ppm U, hranica citlivosti je 2 – 8 ppm U. Napájanie zabezpečujú batérie alebo akumulátory s kapacitou 40 – 100 hodín merania (Mareš et al., 1990).

Meranie gama žiarenia je zaťažené štatistickými chybami, preto presnosť merania rastie s rastom časovej konštanty RC meradla strednej početnosti impulzov. Pre lokalizáciu rádioaktívnych žiaričov je časová konštanta cca 3 s dostačujúca. Pre prieskum v gride je praktickejšie použitie časovej konštanty cca 10 s (IAEA-TRS-186, 1979).

Merania celkovej gama aktivity v prípadoch veľmi vysokej rádioaktivity zvyčajne vyžadujú zavedenie opravy na mŕtvu dobu prístroja. Skôr ako prieskumných meraní sa to týka detailizácie v prípadoch vysokorádioaktívneho rudného materiálu na odkryvoch.

Hodnota pozadia sa stanovuje meraním v čline nad vodnou plochou. Na úrovni hladiny mora a za stabilných „suchých“ meteorologických pomerov sú typickými hodnotami 2 – 5 Ur.

Z viacerých metód ciachovania (pomocou bodového štandardu Ra, nad vodným stĺpcom) je najvhodnejšie ciachovanie nad trojrozmernými umelými rádioaktívnymi štandardami v tvare betónových blokov na ciachovacej základni.

Výsledkom je stanovenie koeficientu citlivosti prístroja v $\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$ na 1 ppm eU (tab. 13), čo u NaI(Tl) detektorov predstavuje hodnotu minimálne 3 – 4 $\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$ na 1 ppm eU (IAEA-TRS-186, 1979).

Denné operácie:

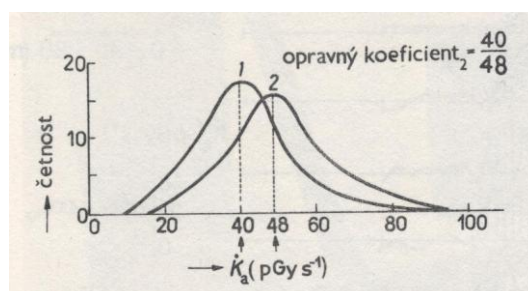
- príprava, kontrola a nastavenie prístroja na základnom bode prieskumnej bázy (kontrola batérií a napájania, kontrola citlivosti pomocou slabého rádioaktívneho žiariča),
- meranie na kontrolnom bode so stálym poľom rádioaktivity, v rovnakej geometrii ako pri prieskume (slúži na záverečnú kontrolu funkčnosti a citlivosti prístroja, na monitorovanie účinkov zmien pôdnej vlhkosti v prieskumnej oblasti a na stanovenie chýb merania),
- vlastné prieskumné meranie na bodoch profilov v jednotnej geometrii (podrobné poznámky o podmienkach merania – povrchové vody, zmeny ω , typ pokryvu, odkryvy, názvy hornín; medzi bodmi merania sa rádioaktivita sleduje akusticky),
- meranie na tom istom kontrolnom bode,
- kontrola aparatury na základnom bode prieskumnej bázy (detto ako ráno).

Merania sa opakujú v objeme 5-10 % prác.

Meranou hodnotou je početnosť impulzov v $\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$ alebo počet impulzov v určenom časovom intervale Δt .

Spracovanie nameraných hodnôt:

- oprava na mŕtvu dobu prístroja (v odôvodnených prípadoch vysokej rádioaktivity),
- oprava na pozadie – odčítanie pozadia od nameraných hodnôt,
- prevod opravených početností impulzov na výsledné jednotky podľa ciachovania (Ur , ppm eU, $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{A}\cdot\text{kg}^{-1}$),
- oprava na meranie príslušného dňa – ak sa výrazne zmenia hodnoty merané na kontrolnom bode,
- zjednotenie výsledkov meraní viacerými prístrojmi na základný rádiometer (obr. 28) (Mareš et al., 1990).



Obr. 28 Krivky početností výsledkov merania dvoma rádiometrami na spoločnom profile (K_a – dávkový príkon, 1 – základný prístroj, 2 – radový prístroj) (Mareš et al., 1990)

Výsledky pešieho merania celkovej gama aktivity hornín sa zobrazujú vo forme máp profilov, máp izolínií alebo kontúrových máp celkovej gama aktivity s krokom izolínií 1,5 – 2-násobku hranice citlivosti. Údaje o meraniach na anomáliách sa vedú v katalógu anomálií. Metódou je možné stanoviť rozdiely $5 \text{ pGy} \cdot \text{s}^{-1}$ a 3 ppm eU , stredná chyba merania sa stanoví z opakovaných meraní na kontrolnom bode.

Hodnoty normálnych polí rádioaktivity jednotlivých litologických typov hornín sa od seba líšia. V odkrytých oblastiach umožňuje rádiometrické mapovanie stanovenie smeru štruktúr a je veľmi ekonomické. Korelovateľnosť anomálií rádioaktivity môže byť zaťažená priestorovou premenlivosťou distribúcie rádioaktívnych prvkov a typom a mocnosťou pokryvných útvarov. Charakteristickým znakom anomálií spojených s mineralizáciou je rast plochy anomálie a jej amplitúdy s hĺbkou prieskumu (Mareš et al., 1990).

2.2.4.2 Meranie pešej gamaspektrometrie prenosnými gamaspektrometrami

Pešia gamaspektrometria sa používa od 60. rokov 20. storočia na kvalitatívne a kvantitatívne zhodnotenie anomálií rádioaktivity pri prieskume na urán, geologickom a geochemickom mapovaní a environmentálnych štúdiách. Ide hlavne o zhodnotenie prítomnosti a množstva prírodných rádionuklidov ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th v horninách a pokryvných útvaroch na základe sledovania energetických okien gama žiarenia centrovaných okolo hodnôt fotopíkov 1461 keV (^{40}K), 1765 keV (^{214}Bi)

a 2615 keV (^{208}Tl) (tab. 15). Rádioaktívny spád umelých rádionuklidov ^{137}Cs a ^{134}Cs je možné detegovať sledovaním dvoch 100 keV širokých okien centrovaných okolo hodnôt 662 keV a 796 keV (IAEA-TECDOC-1363, 2003).

Poľný prenosný gamaspektrometer sa skladá z detektora, časovača, bloku úprav impulzov, analyzátora a výstupného registrátora s LED alebo LCD displejom a elektronickou pamäťou. Hmotnosť prístroja je 4 – 7 kg. Detektormi sú najčastejšie scintilačné počítače s kryštálmi NaI(Tl) o rozmeroch 50 x 50 mm až 80 x 80 mm. Prístroje sú 4-oknové alebo mnohokanálové, prahové alebo diferenciálne. Spracovanie impulzov je analógové (RC 1 – 10 s) alebo digitálne. Meranie vo všetkých nastavených oblastiach energie sa deje súčasne. Prenosné prahové gamaspektrometre majú zvyčajne NaI(Tl) kryštál objemu do 100 cm³ a prepínač niekoľkých úrovni energetických prahov. Referenčný gama žiarič sa používa na reguláciu a nastavenie zosilnenia prístroja. Prahový spektrometer s maloobjemovým kryštálom je vhodný na približné (hrubé) premeranie anomálií celkovej gama aktivity. Najmodernejšie prenosné gamaspektrometre sú diferenciálne. Majú zvyčajne NaI(Tl) kryštál objemu nad 350 cm³ a pracujú s 256 alebo 512 kanálmi v energetickom rozsahu 0 - 3 MeV. Automatická stabilizácia spektra sa zabezpečuje buď pomocou nízkoenergetického piku slabého referenčného žiariča (typicky ^{137}Cs na 0,662 MeV, ale aj ^{133}Ba a ^{60}Co) alebo pomocou piku jedného z prírodných rádionuklidov (^{40}K na 1,46 MeV alebo ^{232}Th na 2,62 MeV). Prístroj zaznamenáva ako celé spektrum gama žiarenia, tak aj súčet počtu impulzov v kanáloch patriacich do sledovaných energetických okien. Ciachovacie konštanty, niekoľko tisícok terénnych meraní alebo niekoľko stoviek celých spektier je možné uložiť do pamäte prístroja. Použitie scintilačných kryštálov veľkých objemov a niekoľkominútová registrácia poľa na jednom meracom bode dáva záruku dostatočnej presnosti kvantitatívnej analýzy.

Zriedkavejšie sa používajú ako detektory aj ďalšie scintilačné látky ako BGO a CsI(Tl), ktoré v porovnaní s NaI(Tl) sú menej krehké a hygroskopické a majú vyššiu účinnosť detekcie (sú však drahšie) (Koomans et al., 2008), alebo polovodičový hyperčistý germániový detektor HPGe s vynikajúcou rozlišovacou schopnosťou (v terénnych aplikáciách sa používa o objeme cca 50 cm³ a časom merania na jednom bode rádovo desiatky minút) (IAEA-TECDOC-1363, 2003).

Terénne operácie pre pešiu gamaspektrometriu prenosnými prístrojmi závisia od účelu prieskumu a od riešeného geologického alebo environmentálneho

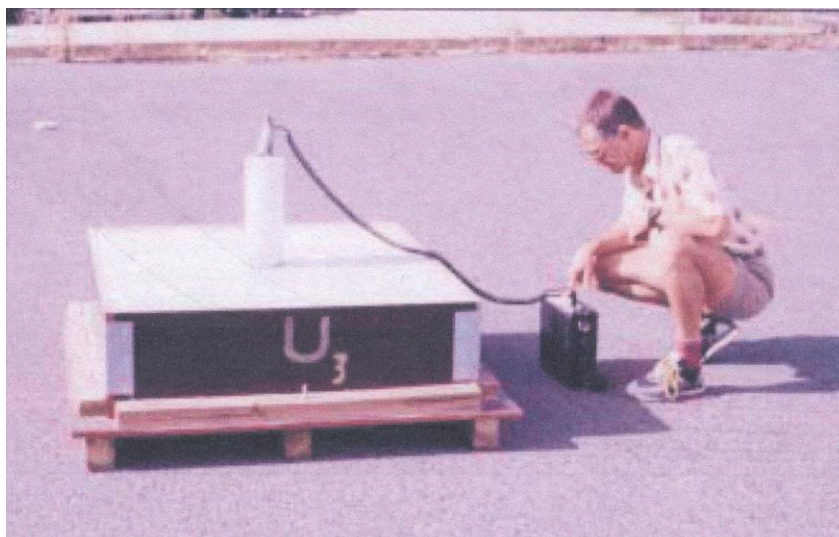
problému. Typ spektrometra, objem detektora, meracie časy a spôsob merania závisia od radiačného prostredia a typu, veľkosti a distribúcie rádioaktívnych zdrojov. Odozva prenosného gamaspektrometra je závislá od veľkosti, lokalizácie a geometrie rádioaktívnych zdrojov. Detektor môže byť umiestnený priamo na zemský povrch (do stredu zarovnanej plochy o priemere 1 – 2 m), alebo v malej výške nad povrchom (čo minimalizuje vplyvy lokálnych nerovnosti terénu a nehomogénnej lokálnej distribúcie rádionuklidov), alebo v jamkách. Ale tá istá geometria zdroj - detektor musí byť použitá ako pri ciachovaní prístroja, tak pri prieskumných meraniach. Dĺžka meracieho času jedného bodu závisí od rádioaktivity zdroja a požadovanej presnosti merania a je obvykle 2 – 4 minúty. IAEA-TECDOC-1363 (2003) uvádza pre detektor 350 cm³ NaI(Tl) merací čas 2 minúty pre vysoko rádioaktívne horniny a 6 minút pre nízko rádioaktívne horniny. Hustota prieskumnej siete sa volí podľa očakávanej sily, veľkosti a distribúcie zdrojov. Malé zdroje je nutné vyhľadávať po profiloch vzdialených iba desiatky metrov. Na druhej strane, regionálne profily poskytnú dobré zhodnotenie rádioaktivity veľkých litologických jednotiek. Systematické paralelné profily sú používané hlavne pri prieskume na nerastné suroviny a pri vyhľadávaní umelých zdrojov. Profily sú orientované kolmo na geologické štruktúry, vzdialenosť profilov a krok merania závisia od výšky detektora a očakávanej veľkosti zdrojov. Základná vzdialenosť profilov je 50 – 250 m, pri detailizácii 5 – 10 m s krokom merania 5 m. Denná produkcia jedným gamaspektrometrom je 30 – 60 bodov. Terénne gamaspektrometrické merania môžu byť realizované statickým alebo dynamickým spôsobom. Pri statickom spôsobe je rádioaktivita meraná na diskretných bodoch. Pri dynamickom spôsobe je meranie realizované počas transportu prístroja na konštantnú vzdialenosť a akumulované počty impulzov predstavujú priemernú rádioaktivitu prejdeho úseku. Príkladom inej metodiky pešej gamaspektrometrie je meranie pre environmentálne účely hodnotenia geologických faktorov životného prostredia zahŕňajúce aj prírodnú rádioaktivitu. Také merania sa v zmysle Smernice MŽP SR č. 1/2000-3 (2000) realizujú formou tzv. referenčných plôch (RP). Na charakteristiku prírodnej rádioaktivity referenčnej plochy je potrebné zmerať 3 – 5 spektrometrických bodov, v závislosti od zložitosti a zmien veľkosti poľa prírodnej rádioaktivity hornín. Spektrometrické body môžu byť rozložené v tvare trojuholníka (3 body) alebo kríža (5 bodov) so vzdialenosťou medzi meranými bodmi 20 m. Tým je daná veľkosť referenčnej plochy. Meranie sa realizuje v jamkách 30 cm x 30 cm x 50 cm. Rádioaktivita referenčnej plochy je definovaná

priemernými hodnotami (aritmetický priemer) gamaspektrometrických údajov. GPS lokalizácia referenčnej plochy je vzťahnutá na jej stred. Spolu s gamaspektrometrickými meraniami sa na referenčnej ploche realizujú aj merania objemovej aktivity ^{222}Rn v pôdnom vzduchu a priepustnosti pôdy za účelom stanovenia jej kategórie radónového rizika. Namerané údaje rádioaktivity spolu s GPS identifikáciou bodu sú ukladané do pamäte. Veľmi osvedčenou praxou je písomné zaznamenávanie akýchkoľvek geologických, topografických, klimatických a environmentálnych poznámok do terénneho zápisníka, čo môže významne pomôcť pri následnej interpretácii údajov.

Moderné prenosné gamaspektrometre automaticky zavádzajú opravu na mŕtvu dobu prístroja tým, že predlžujú dobu merania o adekvátnu hodnotu.

Hodnota pozadia zahŕňa vlastnú rádioaktivitu prístroja, kozmické žiarenie a atmosférický radón. Stanovuje sa meraním v čline nad vodnou plochou rieky alebo jazera s plochými brehmi a minimálne 200 m od nich. Na úrovni hladiny mora a za stabilných „suchých“ meteorologických pomerov sú typickými hodnotami cca 0,5 % K, 1 – 3 ppm eU a 1,5 ppm eTh (IAEA-TRS-186, 1979).

Ciachovanie prenosných gamaspektrometrov sa realizuje nad trojrozmernými umelými rádioaktívnymi štandardmi v tvare betónových blokov s priemerom 3 m a hrúbkou 0,5 m na ciachovacej základni. Odporúčané koncentrácie sú: 8 % K, 50 ppm U a 125 ppm Th (IAEA-TRS-309, 1989). Taktiež je možné využiť menšie transportovateľné ciachovacie betónové bloky (1 m x 1 m x 0,3 m) (obr. 29). Výsledkom 10 minútových meraní nad každým ciachovacím štandardom a ich spracovania je stanovenie stripping pomerov a koeficientov citlivosti prístroja v $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$ na jednotkovú koncentráciu K, U a Th (tab. 22) (IAEA-TRS-309, 1989). Stanovené koeficienty citlivosti prístroja sa opravujú pomocou geometrických korekčných faktorov na hustotu a konečné rozmery ciachovacích štandardov (tab. 23). Ciachovacie betónové štandardy musia byť udržiavané v suchu. Prenosné gamaspektrometre by mali byť ciachované minimálne pred a po terénnej sezóne.



Obr. 29 Ciachovanie prenosného gamaspektrometra pomocou transportovateľného ciachovacieho štandardu (IAEA-TECDOC-1363, 2003)

Tab. 22 Typické hodnoty citlivostí a stripping pomerov pre prenosný gamaspektrometer s NaI(Tl) detektorom 76 x 76 mm (IAEA-TRS-309, 1989)

Citlivosti	K okno	U okno	Th okno
$\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$ na 1 % K	3,36	0	
$\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$ na 1 ppm eU	0,250	0,325	0,011
$\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$ na 1 ppm eTh	0,062	0,075	0,128
Stripping pomery	Pomer citlivostí		Stripping pomer
α	0,075/0,128		0,586
β	0,062/0,128		0,484
γ	0,250/0,325		0,034
a	0,011/0,325		0,034
b = g			0,000

Tab. 23 Geometrické korekčné faktory pre transportovateľné ciachovacie štandardy (Grasty et al., 1991 in IAEA-TECDOC-1363, 2003)

Transportovateľný ciachovací štandard (rozmery 1 x 1 x 0,3 m)	Energia (MeV)	Korekčný faktor (výška detektora = 0,06 m)
--	------------------	---

K štandard ($\rho = 2,23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1,46	1,156
U štandard ($\rho = 2,24 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1,76	1,165
Th štandard ($\rho = 2,28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,62	1,188

Poznámka: výška detektora je výška stredu scintilačného kryštálu nad štandardom

Denné operácie:

- príprava, kontrola a nastavenie prístroja na základnom bode prieskumnej bázy (kontrola batérií a napájania, kontrola citlivosti pomocou slabého rádioaktívneho žiariča),
- meranie na kontrolnom bode so stálym poľom rádioaktivity, v rovnakej geometrii ako pri prieskume (slúži na záverečnú kontrolu funkčnosti a citlivosti prístroja, na monitorovanie pozadia a účinkov zmien pôdnej vlhkosti v prieskumnej oblasti a na stanovenie chýb merania),
- vlastné prieskumné meranie na bodoch profilov v jednotnej geometrii (podrobné poznámky o podmienkach merania – povrchové vody, zmeny ω , typ pokryvu, odkryvy, názvy hornín),
- meranie na tom istom kontrolnom bode,
- kontrola aparatury na základnom bode prieskumnej bázy (detto ako ráno).

Merania sa opakujú v objeme 5-10 % prác.

Meranou hodnotou je počet impulzov v určenom časovom intervale Δt vo zvolenom energetickom okne, ktorý je možné prepočítať na početnosť impulzov v $\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$.

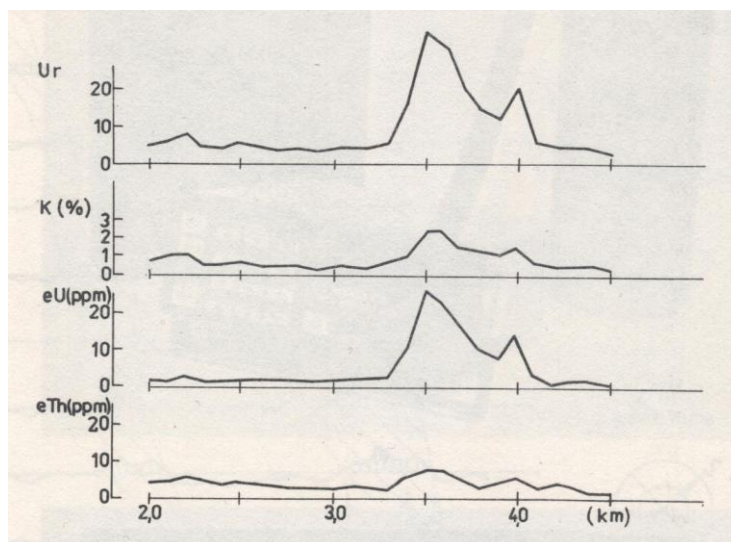
Spracovanie nameraných hodnôt:

- oprava na mŕtvu dobu prístroja (v prípade, že to prístroj nerobí automaticky),
- oprava na pozadie – odčítanie pozadia od nameraných hodnôt,
- výpočet koncentrácií rádioaktívnych prvkov (% K, ppm eU a ppm eTh) z opravených početností impulzov maticovou alebo stripping metódou,
- voliteľne je možný a užitočný výpočet pomerov koncentrácií (Th/K, Th/U, U/K), ktorý redukuje účinok geometrie terénu a často býva indíciou rudnej mineralizácie a horninových alterácií,

- voliteľne je možný prevod koncentrácií rádioaktívnych prvkov na hodnoty dávkového príkonu vo vzduchu alebo expozičného príkonu (tab. 15),
- voliteľne je možné aplikovať na pešie profilové údaje metódy spektrálnych vyhladzovacích techník na potlačenie štatistického šumu v údajoch (IAEA-TECDOC-1363, 2003).

Výsledky pešieho merania prenosnými gamaspektrometrami sa zobrazujú vo forme máp profilov, máp izolínií alebo kontúrových máp celkovej gama aktivity, koncentrácií K, U a Th, ich pomerov, prípadne máp dávkového príkonu gama žiarenia vo vzduchu alebo expozičného príkonu. Množstvo štatistických metód je možné využiť pri štúdiu distribúcie rádioaktívnych prvkov v horninách a pôdach, pričom frekvenčné histogramy na báze geologického, litogeochemického alebo geografického členenia sa používajú asi najčastejšie. Pri meraní digitálnymi spektrometrami s kryštálmi NaI(Tl) 76 x 76 mm má metóda citlivosť lepšiu ako 0,2 %K, 1 ppm eU a 1 ppm eTh (Mareš et al., 1990). Pri 4 minútovom meraní scintilačnými gamaspektrometrami na bode je presnosť na úrovni 0,1 %K, 0,4 ppm eU a 0,6 ppm eTh (IAEA-TECDOC-1363, 2003).

Metóda pešej gamaspektrometrie je časovo náročná, ale poskytuje detailný obraz o distribúcii prírodných rádioaktívnych prvkov v horninách a o príčinách anomálií celkovej gama aktivity (obr. 30) (Mareš et al., 1990).



Obr. 30 Výsledky merania prenosným gamaspektrometrom v oblasti fosfátov lokality Oued Zem v Maroku (Mareš et al., 1990)

2.2.4.3 Povrchové premeriavanie horského reliéfu (PPHR)

(podľa Kolektív autorov, 1979)

Táto modifikácia rádiometrického prieskumu je rekognoskačným premeriaváním plošne rozsiahlych oblastí v nepravidelnej sieti orientačných trás. Používala sa pred niekoľkými desaťročiami geologicko-prieskumnými organizáciami bývalého ČSUP (Československý uránový priemysel).

Meranie je povrchové (geometria 2π) so zápisom po 10 m a spojitou indikáciou poľa gama žiarenia pomocou slúchadiel pripojených k meracej aparatúre.

Použitie je vhodné iba v oblastiach s malou mocnosťou pokryvu (do cca 1,5 m) s veľkým množstvom prirodzených odkryvov, prípadne s pokryvom kamenito-balvanovitého charakteru.

Cieľom tejto metódy je vyčlenenie perspektívnych plôch pre podrobnejší vyhľadávací prieskum v doposiaľ málo preskúmaných oblastiach.

Trasy sú volené v závislosti na moci pokryvu, množstve odkryvov a orientácii v teréne (hrebene, údolia potokov, terénne zárezy a p.).

Operátor zaznamenáva namerané hodnoty do terénneho zápisníka a meranú trasu s vyznačenými orientačnými bodmi do mapy (jeden orientačný bod priemerne na 500 m).

V prípade vysledovania zvýšenej hodnoty expozičného príkonu gama žiarenia zrealizuje orientačné meranie v okruhu 50 m s cieľom nájsť zdroj anomálnej rádioaktivity. Tento bod označí v teréne aj na mape.

Hustota trás odpovedá kondícii mierky 1 : 25 000, t.j. 4 km na 1 km². Jednotlivé trasy sa volia tak, aby bolo územie preskúmané približne rovnomerne.

Rádiometre, používané pre tento druh rádiometrického prieskumu, musia mať vysokú citlivosť a stabilitu.

Kontrolné merania sa odporúčajú vykonávať v rozsahu 10 %.

2.2.5 Hĺbkový gama prieskum

(podľa Mareš et al., 1990 a Lanc, 1990)

Hĺbkový gama prieskum sa používa na zisťovanie rádioaktivity hornín podložia v oblastiach, kde mocnosť pokryvných útvarov dosahuje 10 – 15 m. Zónu s koncentrovanejšou, voči okoliu kontrastnejšou anomáliou, skrytou v nižších

partiách hlbšie vyvinutých zvetralinových plášťov alebo pod alochtónnymi pokryvnými útvarmi, nazývame reprezentatívnym horizontom z hľadiska hĺbkového gama prieskumu. Geometrické podmienky merania sú výhodné, pod priestorovým uhlom $\omega = 4\pi$ sr. Vrtý sa hĺbia pojazdnými penetračno-vrtnými súpravami. V bývalom Československu bol využívaný sondážny agregát EP-10, hydraulicky ovládaný pomocou traktora. Podľa požadovanej hĺbky vrtu sa používa technika zatláčania (penetrácie), rotačného vŕtania a príklepu. Tieto techniky sú v uvedenom poradí postupne pridávané, čo umožňuje sondáž v rôznych druhoch pokryvných útvarov. Priemer vrtov sa pohybuje od 45 do 90 mm.

Rádioaktivita hornín sa obyčajne stanovuje meraním celkovej gama aktivity, v menšej miere gamaspektrometriou. Na meranie sa používajú prenosné rádiometre so scintilačným kryštálom a úzkopriemerová karotážna sonda s priemerom 35 mm a dosahom 10 - 15 m. Meraný signál je spracovávaný analógovo alebo digitálne v celkovom rozsahu $0 - 300 \text{ pA} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Okrem merania gama aktivity umožňujú karotážne zariadenia odoberať vzorky pokryvov a zvetralinového plášťa pomocou prídavného vzorkovača. Pre rôzne typy hornín pokryvných útvarov sa používajú rôzne typy vzorkovačov.

Mierka a metodika hĺbkového gama prieskumu závisí od mocností povrchových útvarov a litológie skúmaného územia. Obyčajne mierka prieskumu býva 1:50 000 až 1:5 000, vzdialenosť vrtov 5 – 10 m na profile alebo v štvorcovej sieti. Rádioaktivita sa meria nespojite s krokom 0,5 m, v anomálnych zónach 0,1 – 0,2 m pri vyťahovaní sondy nahor. Novšie aparatúry umožňujú spojitú registráciu hodnôt aktivity pozdĺž vrtu.

Prístroje sa ciachujú pomocou karotážnych štandardov na ciachovacích základniach.

Spracovanie nameraných hodnôt početnosti impulzov ($\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$) pozostáva z odčítania pozadia a prevodu na výsledné jednotky podľa spôsobu ciachovania (najčastejšie $\text{pA} \cdot \text{kg}^{-1}$ alebo $\text{pGy} \cdot \text{s}^{-1}$).

Výsledky sa zobrazujú ako mapy profilov (alebo izolínií a kontúr) hodnôt na čelbách vrtov alebo hodnôt v určitej hĺbke alebo grafy gama aktivity hornín pozdĺž vrtu.

2.2.6 Rádiometrické vzorkovanie

(podľa Mareš et al., 1990)

Rádiometrické vzorkovanie sa používa na stanovenie koncentrácií rádioaktívnych prvkov a rozmerov rudných telies v banských dielach a na odkryvoch. Je založené na meraní gama aktivity na odkrytých horninách.

Gama aktivita skúmaných lokálnych geologických objektov sa často meria vo vysokom poli gama aktivity geologického okolia, ktoré považujeme za pozadie. Oddelenie oboch veličín sa realizuje použitím detektorov s filtrami alebo rádiometrov smerového príjmu.

Filtre vhodných rozmerov, tvarov a zloženia (najčastejšie Pb) sa umiestňujú medzi detektor a skúmanú horninu. Početnosti impulzov ($\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$) pri meraní bez filtra (n_1) a s filtrom (n_2) sú

$$n_1 = n_A + n_B + n_P,$$

$$n_2 = a \cdot n_A + n_B + n_P,$$

kde n_A – početnosť impulzov od skúmaného rudného objektu,

n_B – početnosť impulzov od okolitých hornín,

n_P – pozadie,

a – koeficient priepustnosti gama žiarenia filtra ($a < 1$).

Riešením rovníc dostávame

$$n_A = \frac{n_1 - n_2}{1 - a}$$

Ak je zrudnenie rovnomerné, potom n_A je časťou početnosti impulzov spôsobenou nekonečným polpriestorom $n_{2\pi}$,

$$n_A = b n_{2\pi} = b \frac{2\pi k Q \rho}{\mu_1},$$

kde b – koeficient závislý od veľkosti filtra (geometrie merania) ($0 < b < 1$),

k – konštanta závislá od kvality zdroja gama žiarenia (číselne je rovná intenzite gama žiarenia vyžarovanej jednotkovou plochou v jednotkovej vzdialenosti od zdroja vo vákuu),

ρ – objemová hmotnosť zdroja gama žiarenia ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$),

μ_1 – lineárny koeficient zoslabenia gama žiarenia v zdroji gama žiarenia,

Q – hmotnostná koncentrácia rádioaktívneho prvku ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) v zdroji gama žiarenia.

Z predchádzajúcich dvoch rovníc dostávame

$$Q = \frac{(n_1 - n_2)\mu_1}{b(1 - a)2\pi k\rho} = c(n_1 - n_2)$$

kde c – koeficient filtra (konštanta pre dané podmienky merania, ktorá sa stanovuje experimentálne nad rudou o známej koncentrácii rádioaktívneho prvku Q).

Rádiometre smerového príjmu sú vybavené zariadením na kompenzáciu rádioaktivity okolia. Sonda prenosného prístroja má dva detektory: detektor hlavného kanálu a detektor kompenzačného kanálu, navzájom oddelené tieniacim filtrom (obr. 31). Tvar filtra podmieňuje príjem plného žiarenia detektorom hlavného kanálu v určitom priestorovom uhle od skúmanej horniny (smer A). Pri dopade rušivého žiarenia okolia (smer B) pôsobí žiarenie plným účinkom na detektor kompenzačného kanálu a filtrom zníženým účinkom na detektor hlavného kanálu, teda početnosti sú v pomere $n_{HB} < n_{KB}$. Za tohto stavu sa oba signály kompenzujú zosilnením $d > 1$ v linke hlavného kanála a na diferenčnom meradle je nula,

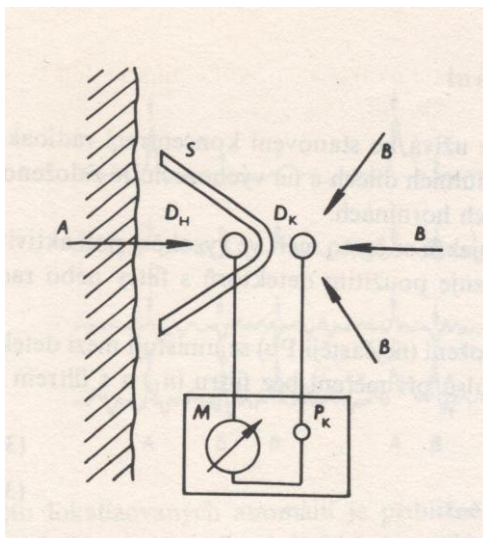
$$d \cdot n_{HB} + n_{KB} = 0.$$

Pri meraní gama aktivity skúmaného objektu (smer A) je $n_{HA} > n_{KA}$, pri zosilnení d je $d \cdot n_{HA} \gg n_{KA}$ a údaj na diferenčnom meradle (n) je blízky účinku gama žiarenia objektu A. Koncentrácia rádioaktívnych prvkov sa stanoví zo vzťahu

$$Q = f \cdot n,$$

kde f – konštanta úmernosti, ktorej hodnotu stanovíme experimentálne na odkrytej rude so známou koncentráciou rádioaktívnych prvkov Q ,

n – meraná početnosť impulzov ($\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$).



Obr. 31 Schéma merania rádiometrom smerového príjmu (A – gama aktivita meraného objektu; B – gama aktivita okolitých zdrojov; D_H , D_K – detektory hlavného a kompenzačného kanálu; M – diferenčné meradlo; P_K – kompenzácia; S – tienenie) (Mareš et al., 1990)

Pri rádiometrickom vzorkovaní sa sledovaná zóna horniny premeriava v profiloch s veľkou hustotou bodov merania alebo plošne. Pri meraní po profiloch priečne na odkryté horniny získame obraz o distribúcii rádioaktívnych prvkov. Pri určovaní koncentrácie U v rudách je nevyhnutné zaviesť opravy na rádioaktívnu rovnováhu a na emanovanie rúd. Korelácia výsledkov rádiometrického vzorkovania a zásekového vzorkovania určuje doplňujúce opravy.

2.2.7 Meranie rádioaktivity morského (jazerného) dna

(podľa Kuznecov a Poljačenko, 1986)

Realizujú sa prieskumy dna jazier, zálivov, príbrežného šelfu a otvorených oceánov a morí metódami gama prieskumu a jadrovogefyzikálnymi metódami röntgenfluorescenčnej analýzy, neutrón – gama a aktivačnou neutrón – gama

metódou. Na transport sa využívajú nízkotonážne lode, batyskafy, malé ponorky, motorové a obyčajné člny.

Pomocou gama prieskumu sa realizuje vyhľadávanie rozsypových ložísk Th (menej U), Ti, vzácnych zemín, Zr, Sn, W, Au, fosforitov, Fe-Mn a mnohoprvkových konkrécií a geologické mapovanie morských a príbrežných sedimentov, štúdium základových hornín pri stavbách prístavných zariadení, štúdium litodynamických procesov v plytkovodnej časti šelfu, atď..

Ako aparatury sa používajú nesériové špeciálne gamaspektrometre na báze mikroprocesorov na rýchle spracovanie a interpretáciu nameraných údajov. Ako detektory slúžia nárazuodolné scintilátory CsI(Tl) alebo scintilačné bloky NaI(Tl) o objeme 3 – 5 litrov a viac, umiestnené vo vodotesných kontajneroch aerodynamického tvaru zavesené na vlečných oceľových lanách pod transportnou loďou. Vyhodnocovacia jednotka je na palube lode. Signál od detektora k analyzátoru sa prenáša buď káblom alebo telemetricky.

Prieskum sa realizuje v plošnej alebo profilovej modifikácii, s diskretnou alebo spojitou registráciou gama poľa v integrálnom alebo spektrálnom režime. Meranie gama poľa je doprevádzané monitorovaním dna pomocou ultrazvukovej kamery a periodickým odberom vzoriek dnových sedimentov.

Sieť meraní sa stanovuje v závislosti od riešenej problematiky a mierky prieskumu. Na šelfe s využitím GPS navigácie lode sa profily orientujú od pobrežia smerom do mora pri malých mierkach a krížom cez anomálne zóny alebo mapované dnové sedimenty pri veľkých mierkach. Na malých vodných plochách sa prieskumné profily krížom cez rudonosné štruktúry vytyčujú značkami na brehu nádrže a farebnými bójami na hladine.

Na začiatku merania sa podvodný kontajner s detektormi spúšťa na dno a upravuje sa dĺžka ťažného lana tak, aby kontajner pri pohybe nenarážal na dno. V priebehu 15 – 20 minút prebieha nastavenie nominálneho režimu prác aparatury a loď je nasmerovaná na prieskumné profily, resp. trasy. Rýchlosť spojitého gama prieskumu je $6 - 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ s integrálnymi rádiometrami a $4 - 7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ so spektrometrami a pri detailizácii $2 - 3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. V epicentrách anomálií sa realizujú diskretné merania a odoberajú sa vzorky vody a dnových sedimentov. Doba akumulácie signálu pri diskretných meraniach je 1 – 3 minúty pri použití energetických okien alebo 20 minút pri registrácii celého spektra.

Na analýzu presnosti a opakovateľnosti meraní a previazania meraní v rôznych dňoch sa realizujú opakované merania profilov a merania na priečnych profiloch.

Gamaspektrometre sa ciachujú na suchu vo vzduchu pomocou nasýtených alebo malých modelov alebo na ciachovacích základniach pod hladinou vody.

2.3 Rádiometrické alfa metódy

Pojem rádioaktivity horninového a pôdneho prostredia je komplexným pojmom, nakoľko v sebe zahŕňa všetky fyzikálne druhy rádioaktívneho žiarenia vznikajúce pri jadrových premenách prírodných i umelých rádionuklidov obsiahnutých v jeho štruktúre. Okrem obsiahleho množstva in situ rádiometrických prieskumných metód založených na detekcii gama žiarenia emitovaného horninami, pôdami a vodami, je možné získavať ďalšie informácie o ich rádioaktivite, a tým aj štruktúre, na základe merania alfa, beta a sčasti aj neutrónového žiarenia. Počet in situ rádiometrických prieskumných metód na báze ich detekcie je však značne obmedzený (viď tab. 1) a v podstate sa zužuje iba na metódu pôdnej emanometrie merajúcej alfa aktivitu pôdneho vzduchu. Obmedzenosť použitia vyplýva z fyzikálnych charakteristík alfa, beta a neutrónového žiarenia. Na druhej strane nachádza detekcia týchto druhov žiarenia obrovské a hlavné využitie pri laboratórnych meraniach rádioaktivity odobratých vzoriek hornín, pôd a vôd a najmä neutrónové žiarenie v oblasti aktívnych metód jadrovej geofyziky (tab. 2 a 3).

Ako vyplýva z obr. 1 sú alfa a beta premeny hlavnými procesmi transformácie nestabilných rádioaktívnych izotopov v rámci všetkých troch prírodných rozpadových radov (^{238}U , ^{235}U a ^{232}Th). Z hľadiska vzniku prieskumnej rádiometrickej metódy pôdnej emanometrie v 20. - 30. rokoch 20. storočia je najdôležitejší fakt, že približne v strede všetkých troch rozpadových radov vznikajú plynné rádioaktívne izotopy chemického prvku radón ($_{86}\text{Rn}$). Tie, ako plyny, sa môžu uvoľniť z pevných minerálnych zŕn horniny do okolitého pórového priestoru vyplneného pôdnym vzduchom a následne, na základe svojho pokračujúceho rádioaktívneho rozpadu, môžu byť zaregistrované vo vzorke pôdneho vzduchu odobratej z pôdy do meracieho prístroja prostredníctvom uvoľneného alfa žiarenia. Vzdušné prostredie detekčnej

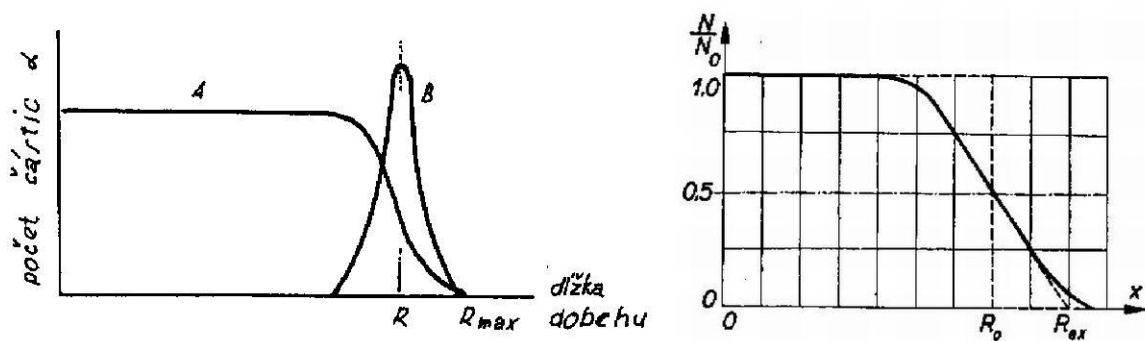
komory emanometra je totiž jediným prostredím, ktorým alfa častice emitované rozpadajúcimi sa jadrami radónu a jeho dcérskych produktov, dokážu preletieť do citlivého objemu detektora.

2.3.1 Fyzikálne základy alfa žiarenia

Alfa (α) žiarenie je prúdom kladne nabitých častíc zložených z 2 protónov a 2 neutrónov štruktúrne ekvivalentných jadru hélia ${}^4_2\text{He}^{2+}$. Alfa častica ${}^4_2\text{He}^{2+}$ sa vyznačuje relatívne veľkou hmotnosťou (4,00389 hmotnostných jednotiek), veľkými rozmermi a veľkým kladným nábojom (2+). Vzniká pri alfa premene nestabilných jadier rádioaktívnych izotopov prvkov.

Energia alfa častíc vznikajúcich pri premenách prírodných rádionuklidov je diskretná a charakteristická pre každý rádioizotop a je v rozmedzí 2 – 9 MeV.

Počiatková rýchlosť alfa častíc je $10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Dráhy alfa častíc sú priamkové. Dolet alfa častice v prostredí závisí od jej kinetickej energie a materiálu absorbujúceho prostredia. Charakter krivky doletu alfa častice v hmotnom prostredí je znázornený na obr. 32.



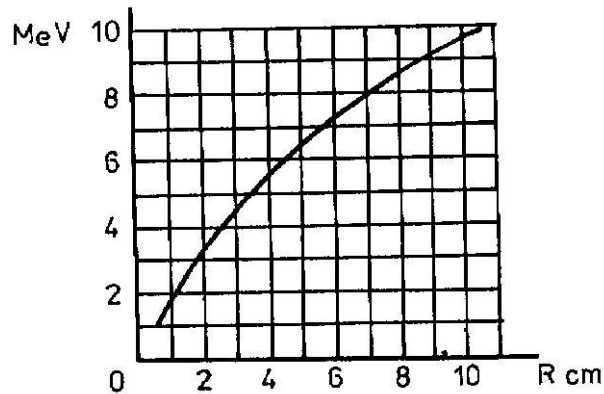
Obr. 32 Krivky doletu alfa častíc v hmotnom prostredí (Brož et al., 1983)

Priechodnosť alfa častíc hmotou je malá: dolet vo vzduchu je rádovo 10^{-2} m , dolet v pevných látkach je rádovo 10^{-2} mm .

Vzťah medzi energiou a doletom alfa častíc vo vzduchu je (Baranov et al., 1957)

$$R = k \cdot E^{3/2},$$

kde R je dolet alfa častice [cm],
 k – koeficient úmernosti ($k = 0,32$),
 E – energia alfa častíc [MeV] (obr. 33).

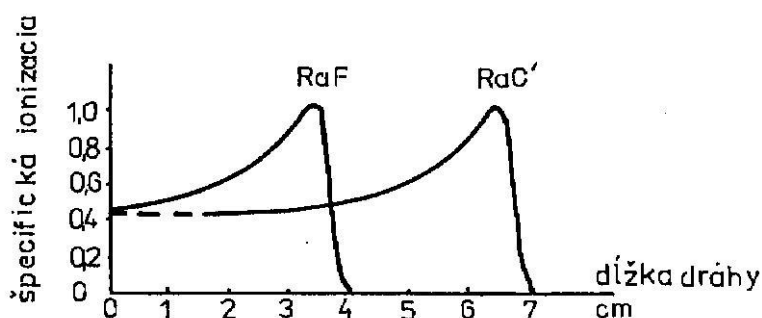


Obr. 33 Graf závislosti doletu alfa častice od jej energie (Baranov et al., 1957, upravené)

Hlavnými procesmi interakcie alfa častíc s hmotným prostredím sú: ionizácia atómov a molekúl, rozptyl na jadrách a budenie brzdného žiarenia (pri vysokých energiách).

Pri ionizácii prostredia sa celá energia dopadajúcich alfa častíc odovzdá absorbátoru. Ionizačná schopnosť alfa častíc je veľmi vysoká – na 1 cm dráhy vytvoria 10^4 párov iónov, pričom ionizácia rastie smerom ku koncu dráhy alfa častice (tzv. Braggova krivka, obr. 34).

Budenie brzdného žiarenia (fluorescencia) a rozptyl alfa častíc na jadrách hmoty sú pomerne zriedkavými javmi.



Obr. 34 Špecifická ionizácia vo vzduchu pozdĺž dráhy alfa častice (Baranov et al., 1957, upravené)

2.3.2 Chemické a fyzikálne vlastnosti radónu, jeho pôvod a transport

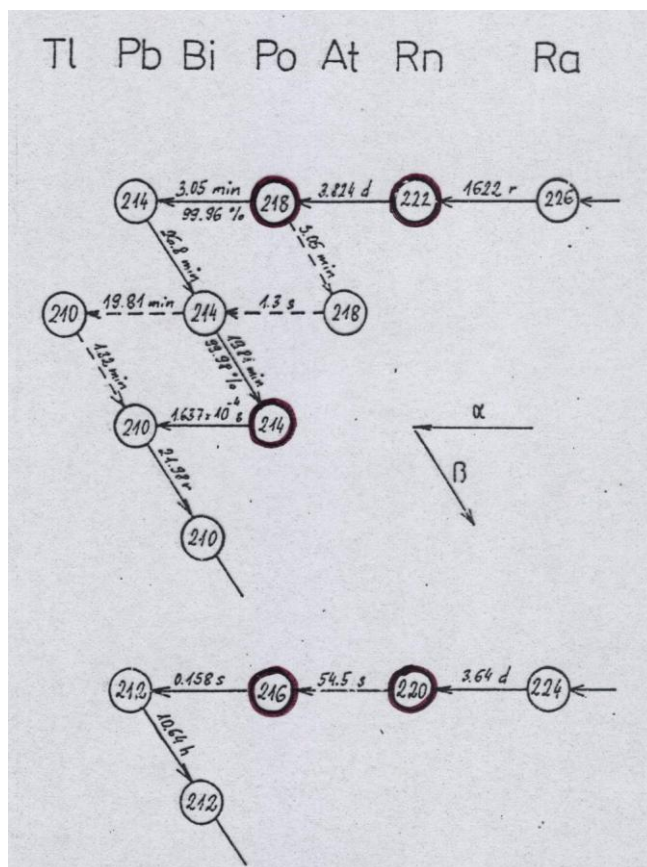
Radón je chemický prvok č. 86 ($_{86}\text{Rn}$) v periodickej sústave prvkov a patrí do skupiny vzácnych plynov spolu s He, Ne, Ar, Kr a Xe. V prírode vystupuje v zmesi 3 izotopov: radónu $^{222}_{86}\text{Rn}$, aktinónu $^{219}_{86}\text{Rn}$ a torónu $^{220}_{86}\text{Rn}$ (tab. 24). Všetky sú prírodné rádioaktívne plyny – emanácie – bez farby, chuti a zápachu, chemicky nezlúčivé (inertné). Sú to významné silne rádiotoxické alfa žiariče. Vznikajú alfa premenou rádioizotopov $_{88}\text{Ra}$ prírodných rozpadových radov ^{238}U , ^{235}U a ^{232}Th (obr. 1) a samotné sa ďalej rozpadajú emisiou alfa a beta častíc na tuhé rádioizotopy s krátkymi polčasmi rozpadu, ktoré sa označujú ako dcérske produkty (DP) rozpadu radónu alebo radónové potomstvo (obr. 35, tab. 25 a 26). Sú to chemicky aktívne častice, ktoré sa takmer okamžite zachytávajú na aerosólových časticiach vo vzduchu (obr. 36).

Tab. 24 Základné charakteristiky izotopov $_{86}\text{Rn}$ (Poláček, 1992; Matolín, 1994)

Rozpadový rad	Materský izotop $_{88}\text{Ra}$	Emanácia $_{86}\text{Rn}$	Označenie a názov	Polčas rozpadu	Rozpadová konštanta $[\text{s}^{-1}]$	Stredná doba života
^{238}U	^{226}Ra	^{222}Rn	Rn, radón	3,825 d	$2,09 \cdot 10^{-6}$	5,518 d
^{235}U	^{223}Ra	^{219}Rn	An,	3,92 s	0,177	3,66 s

			aktinón			
^{232}Th	^{224}Ra	^{220}Rn	Tn, torón	55,3 s	$1,27 \cdot 10^{-2}$	78,7 s

Rádioizotop $^{219}_{86}\text{Rn}$ nemá pre krátky polčas rozpadu a malé pomerné zastúpenie materského ^{235}U praktický význam.



Obr. 35 Schéma vzniku a rozpadu ^{222}Rn a ^{220}Rn . Silnejšie označené rádionuklidy emitujú alfa žiarenie, ktoré sa význačne uplatňuje pri terénnej emanometrii (Matolín, 1989 in Poláček, 1992, doplnené)

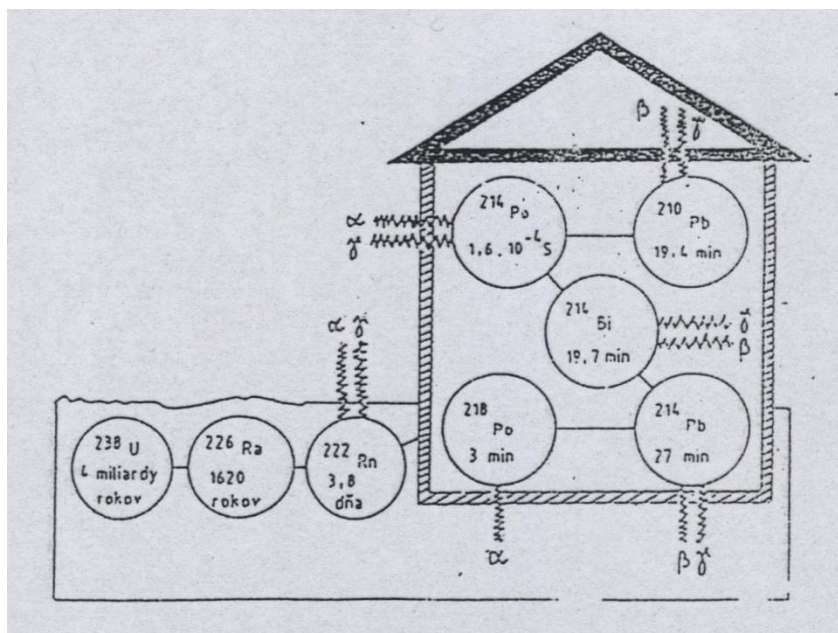
Tab. 25 Základné charakteristiky ^{222}Rn a produktov jeho rozpadu (Matolín, 1989, 1994)

Rádionuklid	Polčas rozpadu	Rozpadová konštanta [s^{-1}]	Typ rozpadu	Energia alfa [MeV]
^{222}Rn	3,824 d	$2,09 \cdot 10^{-6}$	α	5,481

^{218}Po	3,05 min	$3,78 \cdot 10^{-3}$	α, β	5,998
^{218}At	1,3 s	0,533	β	
^{214}Pb	26,8 min	$4,31 \cdot 10^{-4}$	β, γ	
^{214}Bi	19,81 min	$5,83 \cdot 10^{-4}$	β, γ	
^{214}Po	$1,6 \cdot 10^{-4}$ s	$4,233 \cdot 10^3$	α	7,687
^{210}Tl	1,32 min	$8,75 \cdot 10^{-3}$	β	
^{210}Pb	21,98 r	$9,9 \cdot 10^{-10}$	β	

Tab. 26 Základné charakteristiky ^{220}Rn a produktov jeho rozpadu (Matolín, 1989, 1994)

Rádionuklid	Polčas rozpadu	Rozpadová konštanta [s^{-1}]	Typ rozpadu	Energia alfa [MeV]
^{220}Rn	55,3 s	$1,27 \cdot 10^{-2}$	α	6,287
^{216}Po	0,158 s	4,386	α	6,777
^{212}Pb	10,64 h	$1,81 \cdot 10^{-5}$	β, γ	
^{212}Bi	60,6 min		α, β, γ	6,09/6,05



Obr. 36 Zjednodušená schéma rozpadového radu ^{238}U s dcérskymi produktami radónu (Nikodémová, 1992)

Radón je ťažší ako vzduch a objemovou hmotnosťou $9,73 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ je najťažším plynom v prírode. Je rozpustný v kvapalinách – menej vo vode, viac v organických kvapalinách (ropa, olej), pričom jeho rozpustnosť rastie s klesajúcou teplotou. Radón je ľahko absorbovaný uhlím, kaučukom, parafínom a v horninovom prostredí ílmi. Aj absorpcia rastie s klesajúcou teplotou.

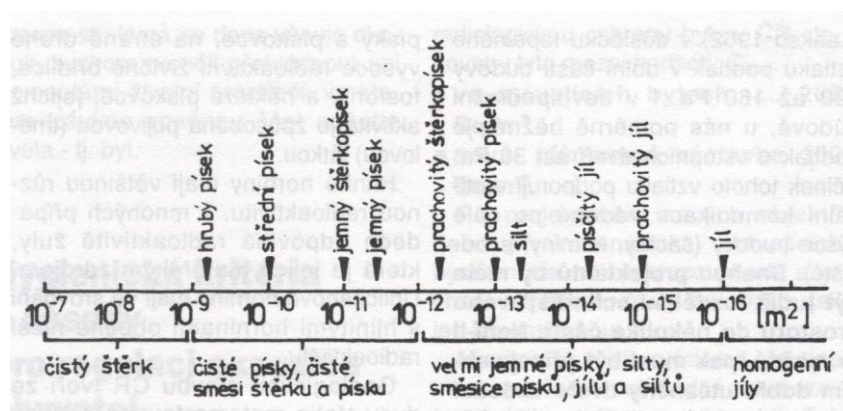
Všetky druhy hornín obsahujú prírodné rádionuklidy. Koncentrácie K, U a Th v jednotlivých typoch hornín magmatických, sedimentárnych a metamorfovaných (tab. 6) a ich pôdnych pokryvoch (tab. 7) sa líšia. Premenami v U a Th radoch vznikajú rádioaktívne emanácie, ktoré sa sčasti dostávajú do voľných intergranulárnych priestorov a do pôdneho vzduchu. Pôdny vzduch alebo vody v horninách sú potom médiom prenosu radónu do atmosférického vzduchu. Hodnota koncentrácie emanácie v pôdnom vzduchu závisí od obsahov U a Th v horninách a od fyzikálnych vlastností hornín, najmä ich schopnosti emanovania a priepustnosti (permeability). Z minerálov materskej horniny, ktorá obsahuje rádium, sa uvoľňujú atómy radónu. Tento proces sa označuje ako emanovanie alebo emanácia. Je to zložitý fyzikálny dej s mnohými štádiami. Zahŕňa fázu rádioaktívneho rozpadu materského prvku v minerále, fázu migrácie atómov Rn po kryštalickej mriežke minerálu k jeho povrchu, príp. defektom, a konečne prechod atómov Rn do pórov, defektov a trhlín. Mieru oddelenia emanácie do voľného priestoru v hornine vyjadruje koeficient emanácie k_{em} , ktorý je definovaný pomerom množstva emanácie uvoľnenej do vonkajšieho prostredia pevnej fázy horniny (do pórov horniny) za jednotku času k množstvu emanácie, ktorá za rovnaký čas z objemu horniny vzniká. Koeficient emanácie závisí od minerálneho a fyzikálneho stavu rádioaktívnej zložky a horniny samotnej, rastie s teplotou horniny, stupňom oxidácie, dekompozíciou minerálov a klesajúcou veľkosťou minerálnych zŕn, závislosť od vlhkosti horniny je zložitá. Obyčajne sa stanovujú a udávajú k_{em} pre ^{222}Rn (tab. 27). Horninám rozvoľneným a poréznym odpovedajú veľké hodnoty k_{em} (0,1 – 0,6), masívnym horninám nízke (0 – 0,1) (Mareš et al., 1990)

Hodnoty plynopriepustnosti (permeability) bežných zemín vykazujú značný rozptyl. Líšia sa až o 10 rádiv. Na obr. 37 sú uvedené typické permeability zemín. Permeabilita závisí od veľkosti a tvaru zŕn zeminy, počtu a orientácii pórov a od

obsahu vlhkosti. Zeminý s väčšími zrnami majú zvyčajne väčšiu permeabilitu. Preto sa priepustnosť zemin odvodzuje od zastúpenia jemnozrnných častíc v nich.

Tab. 27 Hodnoty koeficientu emanácie hornín (Matolín, 1994)

Hornina	$k_{em} (^{222}\text{Rn})$	Odkaz
U-rudy	0,1 – 0,6	Zaporožec, 1977
Piesčité pôdy	0,1 - 0,15	Zaporožec, 1977
Ílovité pôdy	- 0,6	Zaporožec, 1977
Granodiority	0,05 – 0,24	Baranov, 1957
Pieskovce	0,09 – 0,12	Baranov, 1957
Vápence	0,09 – 0,25	Baranov, 1957
Piesčité pôdy	0,1 – 0,2	Løvborg, 1984
Ílovité pôdy	0,2 – 0,35	Løvborg, 1984
Vápnité pôdy a alúviá	0,2 – 0,6	Løvborg, 1984



Obr. 37 Permeabilita zemin v m^2 (Nazaroff a Nero, 1988 in Jiránek a Pospíšil, 1993)

Ako už z vyššie uvedeného textu vyplýva, je transport radónu z miest jeho vzniku cez nadložné vrstvy až k zemskému povrchu ovplyvňovaný priepustnosťou vrstiev, mierou zhutnenia, vlhkosťou pôdy, difúznymi vlastnosťami a polčasom rozpadu radónu. Emanácie sa v horninách šíria dvoma spôsobmi: difúziou a konvekciou. V suchých piesčitých zeminách sa radón môže šíriť difúziou až na vzdialenosť 6 – 10 m, v jemnozrnných zeminách (napr. íle) je difúzna dĺžka

maximálne okolo metra (Åkerblom, 1981 in Jiránek a Pospíšil, 1993). Vlhkosť pôdy značne ovplyvňuje dĺžku transportu difúziou. Vo vode je difúzna dĺžka len asi decimeter. Prevažná časť radónu sa však vo vode rozpúšťa a je ňou transportovaná na veľké vzdialenosti (až 100 m), kým sa väčšina radónu nerozpadne. Táto forma transportu radónu sa označuje ako prúdenie (konvekcia) a okrem vody ju zabezpečuje hlavne pôdny vzduch trhlinami zvetraných a porušených hornín a poréznymi materiálmi. Konvekciou sa radón môže šíriť na vzdialenosť 150 – 200 m. Aj konvekcia je silne ovplyvňovaná vlhkosťou a plynopriepustnosťou.

Pre rovnovážne podmienky vzniku a premeny emanácie, ktoré sú splnené v dostatočne veľkej hĺbke od zemského povrchu, možno objemovú aktivitu ^{222}Rn v pôdnom vzduchu stanoviť podľa vzťahu (Matolín, 1994)

$$a_{V,\text{Rn-222}} = a_{m,\text{Ra-226}} \cdot \rho \cdot k_{em} \cdot p^{-1},$$

kde $a_{V,\text{Rn-222}}$ je objemová aktivita ^{222}Rn v pôdnom vzduchu [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$],

$a_{m,\text{Ra-226}}$ – hmotnostná aktivita ^{226}Ra v hornine [$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$],

ρ – objemová hmotnosť horniny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

k_{em} – koeficient emanácie (hodnoty 0 – 1),

p – pórovitosť horniny (hodnoty 0 – 1).

Ak uvažujeme aj vplyv vlhkosti horniny, predchádzajúci vzťah nadobudne tvar (Matolín, 1994)

$$a_{V,\text{Rn-222}} = \frac{a_{m,\text{Ra-226}} \cdot \rho \cdot k_{em}}{p[w(K_T - 1) + 1]}$$

kde w je vlhkosť horniny [%],

K_T – koeficient rozpustnosti ^{222}Rn vo vode.

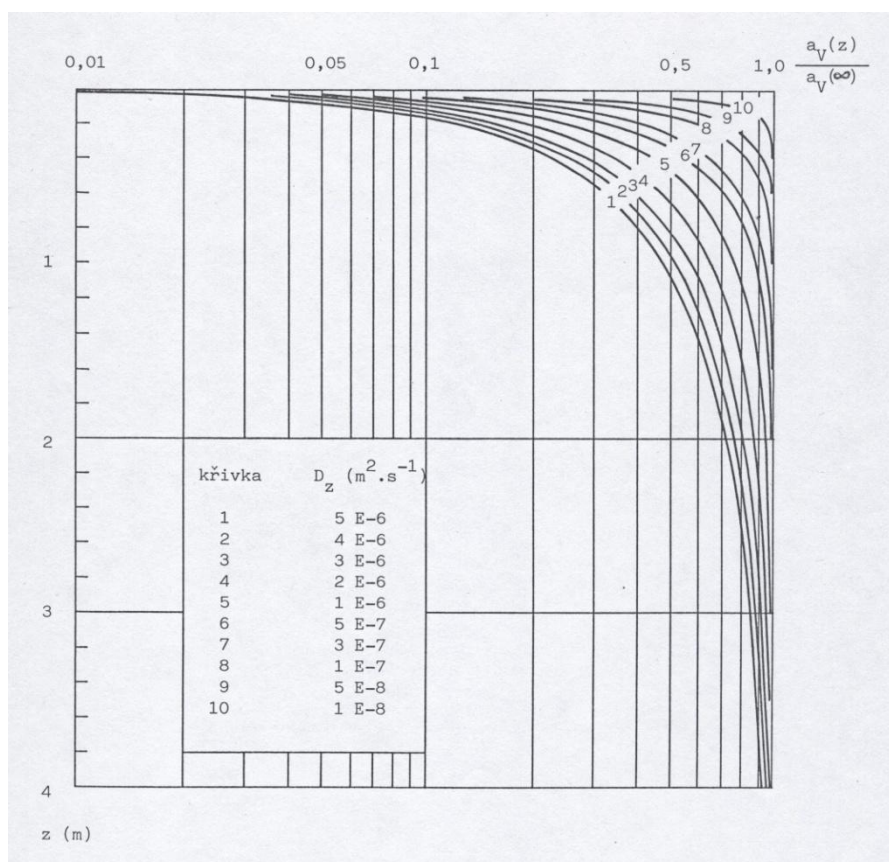
Emanácie unikajú do atmosférického vzduchu (koncentrácia ^{222}Rn je tu o tri rady nižšia ako v pôdnom vzduchu) cez zemský povrch, preto je v priepovrchovej

vrstve hornín a pôd koncentrácia emanácií znížená. Hodnota objemovej aktivity ^{222}Rn v závislosti na hĺbke z [m] od povrchu Zeme a permeabilite hornín pre plyny, vyjadrenej zdanlivým koeficientom difúzie D_z [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], je určená vzťahom (Matolín, 1994)

$$a_{V,z} = a_{V,\infty} \left(1 - e^{-z \sqrt{\frac{\lambda_{\text{Rn}-222}}{D_z}}} \right)$$

kde $\lambda_{\text{Rn}-222}$ je rozpadová konštanta ^{222}Rn ($2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$),
 $a_{V,\infty}$ je $a_{V,\text{Rn}-222}$ z predchádzajúcich dvoch vzťahov.

Pole objemovej aktivity ^{222}Rn v malých hĺbkach od zemského povrchu v závislosti na D_z ilustruje obr. 38, zdôrazňujúci význam merania aktivity pôdneho vzduchu v jednotnej a podľa možnosti čo najväčšej hĺbke.



Obr. 38 Nárast objemovej aktivity ^{222}Rn v pôdnom vzduchu s hĺbkou v závislosti od hodnoty zdanlivého koeficientu difúzie hornín (Matolín, 1994)

Pre typické hodnoty pôd $k_{em} = 0,2$; $\rho = 1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $p = 0,25$ (UNSCEAR, 1988 in Matolín, 1994) a stacionárne podmienky šírenia radónu podmieňuje koncentrácia 1 ppm U v hornine objemovú aktivitu ^{222}Rn v pôdnom vzduchu $16\,000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Matolín, 1994). Tieto hodnoty sú blízke hodnotám terénnych meraní. Obvyklé hodnoty podľa koncentrácie emanácie v horninách sú v rozmedzí $0 - 200 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, anomálie dosahujú rádovo $10^3 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.3.3 Spôsoby merania radónu v pôdnom vzduchu

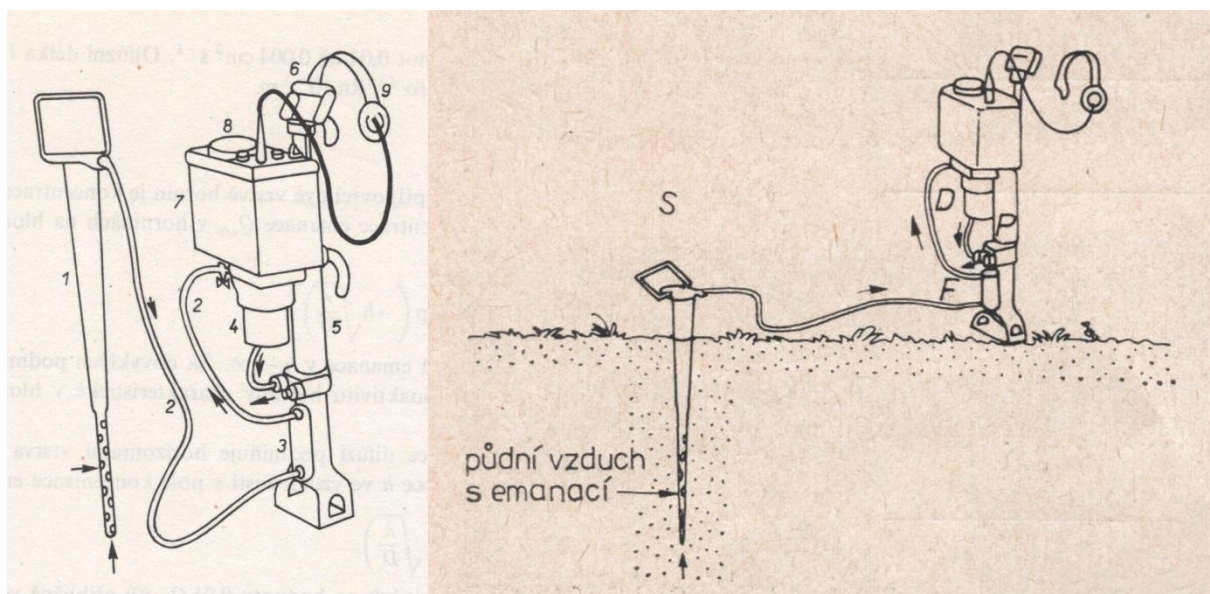
Stanovenie prítomnosti radónu v pôdnom vzduchu je založené na detekcii žiarenia emitovaného pri rozpade radónu a/alebo jeho dcérskych produktov alebo na absorpcii radónu a jeho potomstva vhodnými materiálmi umiestnenými do pôdneho alebo horninového prostredia. Podľa toho rozdeľujeme meracie metódy na meranie prenosnými emanometrami a na expozičné emanačné metódy.

2.3.3.1 Meranie emanácií prenosnými emanometrami

Toto meranie poskytuje okamžité výsledky hneď v teréne. Emanometre pracujú na princípe ionizačnej komory alebo impulzného scintilačného detektora alfa častíc vo vzorke odobraného pôdneho vzduchu (obr. 39).

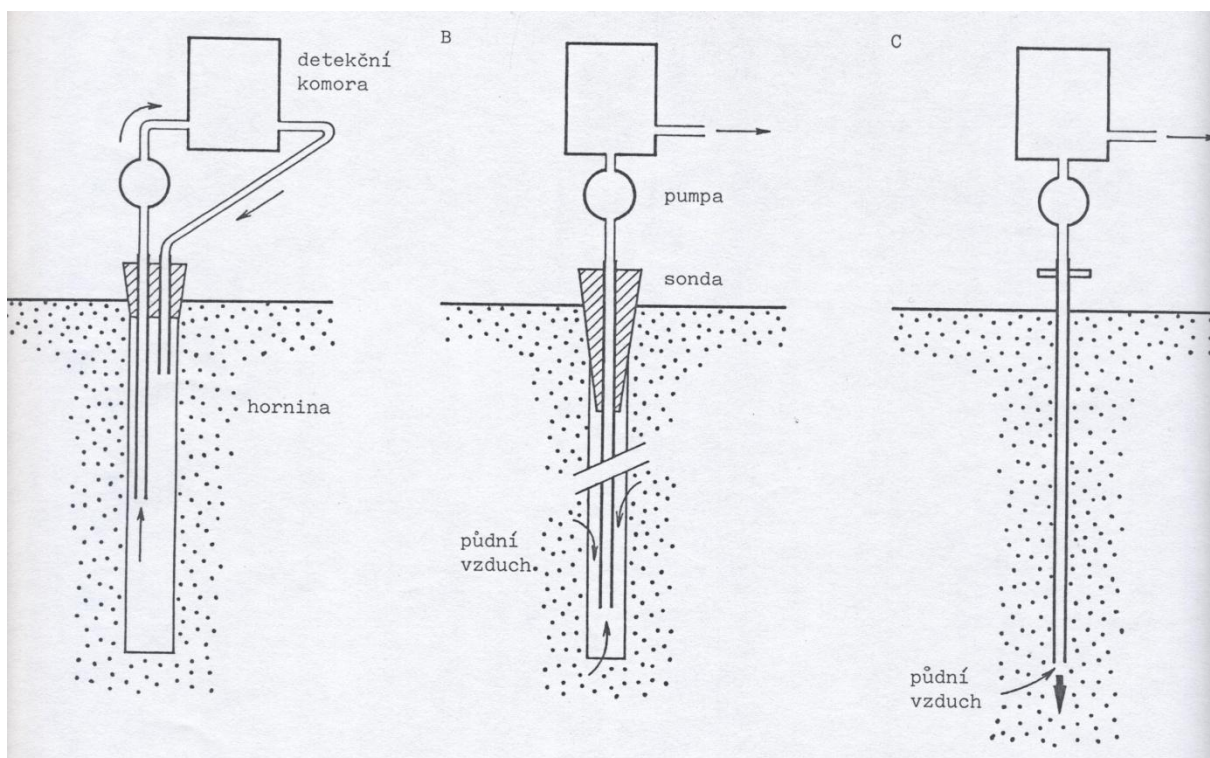
Ako scintilačná látka sa používa ZnS(Ag) vo forme náteru na vnútorných stenách detekčnej meracej komory prístroja. Moderné prístroje používajú namiesto stabilnej detekčnej komory vymieňateľné hliníkové alebo sklenené vložky s náterom ZnS(Ag) , tzv. Lucasove komôrky (Lucas cells), čím sa znižuje hodnota pozadia od usadených produktov rozpadu radónu predchádzajúcej meranej vzorky vzduchu a zvyšuje sa pomer užitočného signálu k pozadiu. Meraný signál sa vyhodnocuje analógovo (RC) alebo digitálne, počet impulzov N za čas Δt , početnosť impulzov ($\text{imp}\cdot\text{s}^{-1}$) alebo ionizačný prúd sú mierou koncentrácie emanácie vo vzorke pôdneho vzduchu. Hmotnosť emanometrov je $6 - 8 \text{ kg}$.

Metóda vyžaduje precízny odber definovaného objemu pôdneho vzduchu z konštantnej hĺbky. Odber vzoriek pôdneho vzduchu sa realizuje pomocou špeciálnych sond dynamickým alebo statickým spôsobom (obr. 40).



Obr. 39 Scintilačný impulzný emanometer EM-6 (Mareš et al., 1990; Gruntorád et al., 1985)

(1, S – sonda; 2 – spojovacie hadice; 3, F – mechanický filter a sušič vzduchu; 4, D – detekčná komora s povlakom ZnS(Ag) 0,5 l; 5, P – čerpadlo; 6 – rukoväť čerpadla; 7 – blok emanometra; 8 – meradlo; 9 – slúchadlá)

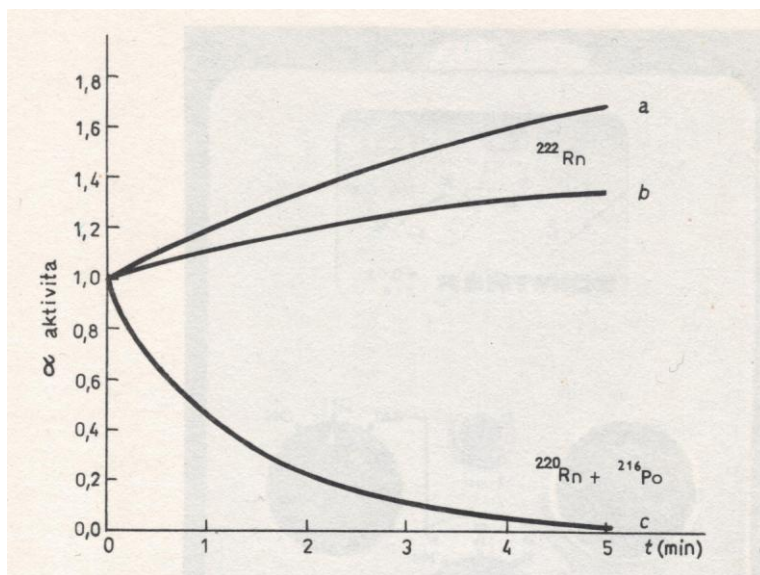


Obr. 40 Postupy odberov vzoriek pôdneho vzduchu (Matolín, 1994)

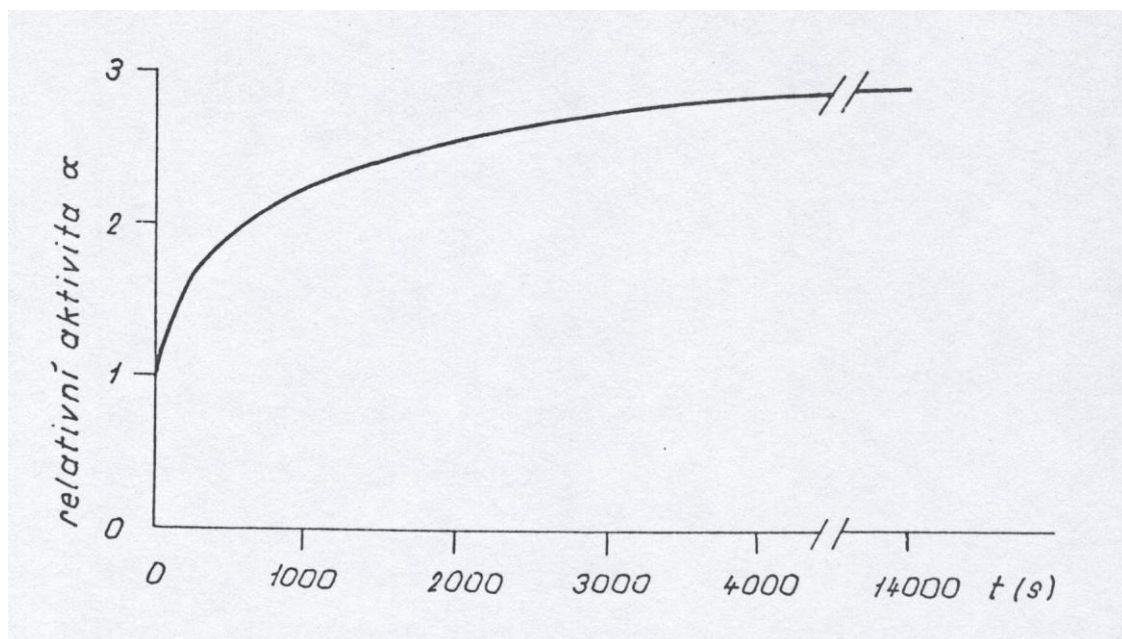
Dynamický spôsob spočíva v presávaní pôdneho vzduchu z hĺbky 0,2 – 3 m cez detekčnú komoru počas 5 – 15 minút do získania stabilných hodnôt prístroja (obr. 40A). Statický spôsob spočíva v jednotlivých odberoch vzoriek pôdneho vzduchu z hĺbok 0,6 – 1 m do meracej komory (obr. 40B, C). Odber pôdneho vzduchu sa realizuje cez prachový mechanický filter a vysušovač (hygroskopická látka). Veľmi dôležité je dôkladné utesnenie odbernej sondy, aby nedošlo k zriedeniu pôdneho vzduchu atmosférickým, tesnosť celého systému a odber nominálneho (stále rovnakého) množstva vzduchu zo stále rovnakej hĺbky. V opačnom prípade sú nutné opravy na odobratý objem vzorky pôdneho vzduchu a na hĺbku odberu.

Po vložení vzorky pôdneho vzduchu do detekčnej komory a jej uzavretí je alfa aktivita v detekčnej komore časovo premenlivá:

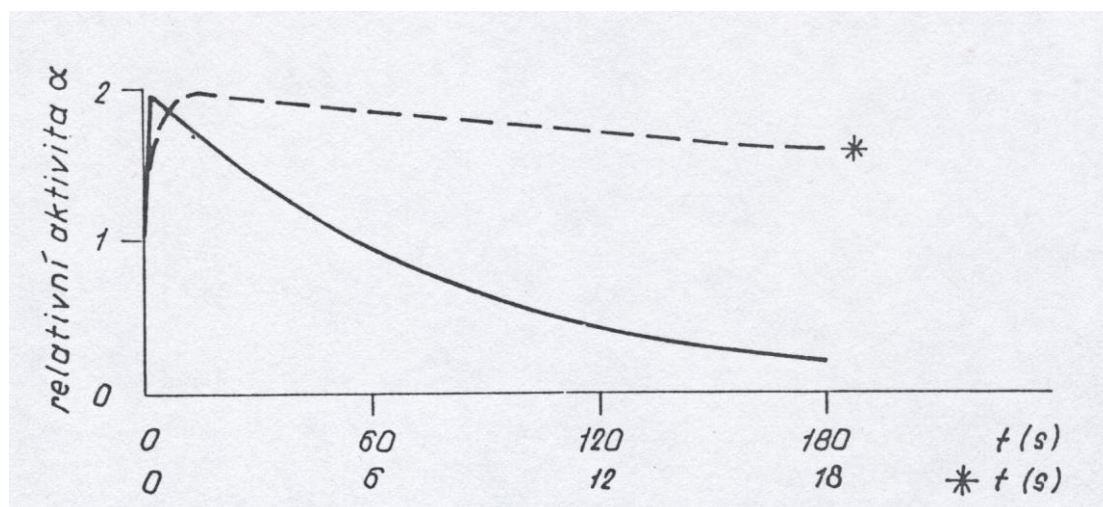
- alfa aktivita ^{222}Rn a jeho rozpadových produktov rastie v prvých troch hodinách (0 – 240 min) (obr. 41, 42),
- alfa aktivita ^{220}Rn a jeho rozpadových produktov rastie v prvých 2 sekundách a potom progresívne klesá (obr. 41, 43).



Obr. 41 Závislosť alfa aktivity emanácie na čase (Mareš et al., 1990)



Obr. 42 Závislosť relatívnej alfa aktivity ^{222}Rn a produktov jeho rozpadu na čase po vložení emanácie v $t = 0$ (Matolín, 1994)



Obr. 43 Závislosť relatívnej alfa aktivity ^{220}Rn a produktov jeho rozpadu na čase po vložení emanácie v $t = 0$ (Matolín, 1994)

Na základe rozdielnych účinkov ^{222}Rn a ^{220}Rn je možné meraním alfa aktivity v časoch $t = 0, 1, 2, 3$ min po vložení pôdneho vzduchu do detekčnej komory určiť kvalitatívne charakter emanácie (radónová, torónová, zmiešaná). Rovnice pre

stanovenie ^{222}Rn a ^{220}Rn v pôdnom vzduchu z merania v časoch t_1 a t_2 majú tvar (Mareš et al., 1990; Matolín, 1994)

$$\begin{aligned} A_1 \cdot ^{222}\text{Rn} + B_1 \cdot ^{220}\text{Rn} &= a_0 \cdot n_1 \\ A_2 \cdot ^{222}\text{Rn} + B_2 \cdot ^{220}\text{Rn} &= a_0 \cdot n_2, \end{aligned}$$

kde ^{222}Rn a ^{220}Rn sú alfa aktivity [Bq] v detekčnej komore v čase $t_0 = 0$,

n_1 a n_2 sú čítania prístroja v časoch t_1 a t_2 ,

a_0 – konštanta emanometra určená ciachovaním pre čas t_0 ,

A_i – koeficienty vyjadrujúce relatívnu alfa aktivitu ^{222}Rn a jeho produktov rozpadu v čase t_i vzhľadom k jednotkovej počiatočnej hodnote v čase t_0 ; $A_0 = 1$

B_i – koeficienty vyjadrujúce relatívnu alfa aktivitu ^{220}Rn a jeho produktov rozpadu v čase t_i vzhľadom k jednotkovej počiatočnej hodnote v čase t_0 ; $B_0 = 1$

Vo väčšine aplikácií je však postačujúce iba stanovenie koncentrácie ^{222}Rn . V zmysle obr. 41 – 43 je jeho kvantitatívne určenie v analyzovanej vzorke pôdneho vzduchu tým presnejšie (príspevok od ^{220}Rn je tým menší), čím väčší je časový interval od t_0 do t_i . Existuje metodika merania, kedy sa vzorky pôdneho vzduchu odoberajú v teréne do prenosných hermeticky uzavretých Lucasových komôrok ($t_0 = 0$) a k ich vkladaniu do meracej komory prístroja a vyhodnocovaniu ich alfa aktivity dochádza až v laboratóriu po čase $t_i \geq 180$ min. Nevýhodou je, že to už nie sú okamžité in situ výsledky. Dôležitou podmienkou korektnosti výsledkov je, aby bola dodržaná tá istá metodika merania pri terénnom meraní ako pri ciachovaní prístroja a v rámci celého terénneho merania použitá jednotná metodika.

Mierky terénnych emanometrických meraní pre geologické účely sú zhodné s peším gama prieskumom. Vzdialenosť bodov merania na profile je 2 – 10 m. V súčasnosti sa najčastejšie používa statický spôsob odberu vzoriek pôdneho vzduchu metodikou tzv. strateného hrotu (obr. 40C) z optimálnej hĺbky 0,8 m pomocou definovaného objemu veľkoobjemovou výplachovou striekačkou (JANETTE). Hodnoty signálu sa odčítavajú v konštantnom čase po vložení pôdneho

vzduchu do detekčnej Lucasovej komory. Celé meranie je poloautomatizované a riadené naprogramovaným mikropočítačom v súčinnosti s citlivým manometrom detekčnej komory. Meranie každého odberu pôdneho vzduchu sa realizuje s novou Lucasovou komôrkou. Zistené anomálie sa skúmajú detailným meraním – ako zahusťovaním meracích bodov v ploche, tak prehľbovaním odberu po 0,2 – 0,5 m. Stanovuje sa charakter emanácie.

Špecifická metodika platí pre aplikáciu prenosných emanometrov na environmentálne účely stanovenia radónového rizika základových pôd stavebného pozemku. Postup takýchto meraní je predmetom samostatnej vhlášky MZ SR (aktuálna je Vyhláška MZ SR č. 528/2007 Z.z.). Hodnotenie rizika prenikania radónu zo základových pôd stavebného pozemku sa vykonáva na základe stanovenia objemovej aktivity ^{222}Rn v pôdnom vzduchu a plynopriepustnosti pôdy. Stanovenie objemovej aktivity ^{222}Rn sa vykonáva jej meraním vo vzorkách pôdneho vzduchu odobratých z hĺbky 0,8 m na minimálne 15 rôznych bodoch budúcej zastavanej plochy a v jej najbližšom okolí, rovnomerne rozložených v základnej sieti 10 x 10 m alebo hustejšej. Objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu sa vypočíta ako tretí kvartil (0,75 – kvantil) súboru nameraných hodnôt s vylúčením hodnôt menších ako $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. Priepustnosť základových pôd stavebného pozemku sa stanovuje podľa tabuľky zdokumentovaním vertikálneho profilu pôdy a podielu jemných častíc (tab. 28) v zeminách a rozložených horninách v jednotlivých vrstvách profilu najmenej na 3 miestach pozemku, pričom na hodnotenie radónového rizika sa použije zistená maximálna priepustnosť. Smernou hodnotou na vykonanie opatrení proti prenikaniu radónu z podlažia stavby je objemová aktivita ^{222}Rn v pôdnom vzduchu $10 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ v dobre priepustných základových pôdach, $20 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ v stredne priepustných základových pôdach a $30 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ v slabo priepustných základových pôdach.

Tab. 28 Kategórie priepustnosti základových pôd podľa podielu jemných častíc f (STN 73 1001)

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

Podobná metodika sa používa pri terénnych meraniach na účely hodnotenia geologických faktorov životného prostredia vo forme máp prognóz radónového rizika hodnoteného regiónu v mierke 1:50 000. Také merania sa v zmysle Smernice MŽP SR č. 1/2000-3 (2000) realizujú formou tzv. referenčných plôch (RP) podobne ako v prípade pešej gamaspektrometrie. Pod pojmom referenčná plocha sa pri radónovom prieskume rozumie plocha odberu vzoriek pôdneho vzduchu z minimálne 15 rôznych odberných bodov v sieti 10 x 10 m a hustejšej, z hĺbky 0,8 m za účelom stanovenia objemovej aktivity ^{222}Rn v pôdnom vzduchu. Výsledná hodnota, priradená každej referenčnej ploche, je daná štatistickým priemerom nameraných hodnôt s vylúčením hodnôt menších ako $1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$. Pre účely stanovenia plynopriepustnosti sa odoberajú vzorky zemín a rozložených hornín z hĺbky 0,8 m v rozsahu 1 vzorka na 1 referenčnú plochu. Kombináciou zistenej objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu a plynopriepustnosti hornín (tab. 28) sa stanovuje kategória radónového rizika (nízke, stredné a vysoké) pre referenčnú plochu v zmysle tab. 29.

Tab. 29 Kategórie radónového rizika geologického podložia (Smernica MŽP SR 1/2000-3)

Kategória rizika	Objemová aktivita ^{222}Rn [$\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$] v pôdnom vzduchu v základovej pôde s priepustnosťou:		
	nízkou	strednou	vysokou
nízke	< 30	< 20	< 10
stredné	30 – 100	20 – 70	10 – 30
vysoké	> 100	> 70	> 30

Z nameraných údajov sa zostavuje mapa prognózy radónového rizika geologického podložia.

Registrované počtynosti impulzov sa opravujú o mŕtvu dobu detektora, ktorá u scintilačných emanometrov činí rádovo prvé desiatky μs (10^{-5} s).

Moderné prenosné prístroje kompenzujú pozadie. Pozadie predstavuje alfa aktivita atmosférického vzduchu v detekčnej komore pred vložením vzorky pôdneho vzduchu určenej na analýzu.

Prenosné emanometre sa ciachujú pomocou tekutých štandardov solí rádia. V uzavretom štandarde (premývačke) obsahujúcom m gramov rádia sa rozpadom ^{226}Ra nahromadí za dobu t aktivita ^{222}Rn (Mareš et al., 1990)

$$A_{\text{Rn}} = m_{\text{Ra}}(1 - e^{-\lambda_{\text{Rn}}t}) \cdot 3,7 \cdot 10^{10},$$

kde A_{Rn} je aktivita ^{222}Rn [Bq],

m_{Ra} – hmotnosť Ra [g],

λ_{Rn} – rozpadová konštanta ^{222}Rn ($1,26 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1}$).

Po odobratí vzorky vzduchu o objeme V [l] z uzavretého štandardu a jej vložení do detekčnej komory je jej objemová aktivita [$\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$] v čase $t_0 = 0$

$$A_{V,\text{Rn-222}} = A_{\text{Rn}} \cdot V^{-1}$$

a meraním v čase t_i podmieni početnosť impulzov $n(t_i)$ v $\text{imp} \cdot \text{min}^{-1}$. Odozva prístroja (ciachovacia konštanta) na 1 Bq ^{222}Rn je (Plch, 1994; Matolín, 1994)

$$a(t_i) = \frac{n(t_i) - n_p}{a_{V,\text{Rn-222}} \cdot V}, \quad [\text{imp} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}]$$

kde n_p je početnosť impulzov pozadia [$\text{imp} \cdot \text{min}^{-1}$],

$n(t_i)$ – početnosť impulzov od meranej vzorky v čase t_i [min] po zavedení vzorky do detekčnej komory [$\text{imp} \cdot \text{min}^{-1}$],

V – objem zavedenej vzorky [l].

Objemová aktivita ^{222}Rn v pôdnom vzduchu sa analogicky stanoví za použitia tej istej metodiky a časov merania ako pri ciachovaní (Matolín, 1994)

$$a_{V,\text{Rn-222}} = \frac{n(t_i) - n_p}{a(t_i) \cdot V}, \quad [\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1} = \text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Ciachovanie moderných emanometrov sa realizuje zvyčajne (najmä pre účely použitia na stanovenie radónového rizika geologického podložia) v certifikovanej referenčnej radónovej komore metrologického strediska.

Denné operácie:

- príprava a kontrola prístroja na základnom bode prieskumnej bázy (kontrola batérií a napájania, kontrola funkčnosti pomocou referenčného Ra žiariča),
- meranie na kontrolnom bode rovnakou metodikou ako pri prieskume (slúži na záverečnú kontrolu funkčnosti a citlivosti prístroja, na monitorovanie zmien koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu v prieskumnej oblasti počas meracieho obdobia a na stanovenie chýb merania),
- vlastné prieskumné meranie na bodoch profilov v jednotnej metodike,
- meranie na tom istom kontrolnom bode,
- kontrola aparatury na základnom bode prieskumnej bázy.

Merania sa opakujú v objeme 5 – 10 % prác za účelom hodnotenia opakovateľnosti meraní.

Meranou veličinou v prípade prenosných emanometrov s ionizačnou komorou je ionizačný prúd [A] a v prípade impulzných scintilačných prístrojov počet impulzov za časový interval Δt , prípadne početnosť impulzov [$\text{imp} \cdot \text{min}^{-1}$, $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$]. Moderné emanometre umožňujú po ciachovaní poskytovať výsledný údaj priamo v $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Spracovanie nameraných hodnôt:

- oprava na mŕtvu dobu prístroja (ak to prístroj nerobí automaticky),
- oprava na pozadie – odčítanie pozadia od nameraných hodnôt,
- oprava na nominálny objem vzorky pôdneho vzduchu vynásobením nameranej hodnoty pomerom $V_{\text{nom}}/V_{\text{odb}}$, kde V_{nom} je nominálny objem a V_{odb} je skutočný (menší) objem odobratej vzorky pôdneho vzduchu,
- oprava na nominálnu hĺbku odberu pôdneho vzduchu v zmysle obr. 38 a príslušnej rovnice,

- výpočet objemových aktivít ^{222}Rn a ^{220}Rn alebo len ^{222}Rn v závislosti od zvolenej metodiky merania a spôsobu ciachovania.

Výsledky emanometrie prenosnými prístrojmi sa zobrazujú ako mapy profilov a v prípade hustej izomérskej siete meraní (stavebné pozemky) aj ako mapy izolínií a kontúrové mapy objemovej aktivity pôdneho radónu. Výsledky regionálnych meraní v mierkach menších ako 1:10 000 sa zobrazujú pomocou kruhových diagramov referenčných plôch s vyjadrením percentuálneho zastúpenia jednotlivých kategórií radónového rizika, prípadne ako mapy prognóz radónového rizika (Smernica MŽP SR 1/2000-3, 2000).

Pozitívnymi znakmi pri prieskume U zrudnenia sú vysoké hodnoty anomálneho poľa, radónový (^{222}Rn) charakter emanácie, rast koncentrácie emanácie s hĺbkou a zvýšená gama aktivita v oblasti radónovej anomálie.

Merané hodnoty sú úzko lokálne a závisia od klimatických podmienok v dobe merania. Presušenie, podmäčanie, zmrznutá pôda, zmeny tlaku a cirkulácie atmosférického vzduchu ovplyvňujú namerané hodnoty. Kvalita merania rastie s hĺbkou odberu pôdneho vzduchu, údaje sú porovnateľné pre rovnaké hĺbky odberu.

Hlbinný dosah emanometrie umožňuje lokalizáciu U telies v podmienkach, kedy povrchovým gama prieskumom nie sú objekty detekovateľné. Pri geologickom mapovaní sa hodnotí úroveň normálnych polí koncentrácie emanácie a typ variability polí jednotlivých geologických štruktúr. V priaznivých prípadoch sa tektonické poruchy a pásma rozložených hornín prejavujú v dôsledku zvýšenej hodnoty koeficientu emanácie a možností pohybu radónu kladnými anomáliami.

Metóda pôdnej emanometrie prenosnými emanometrami je časovo značne náročná.

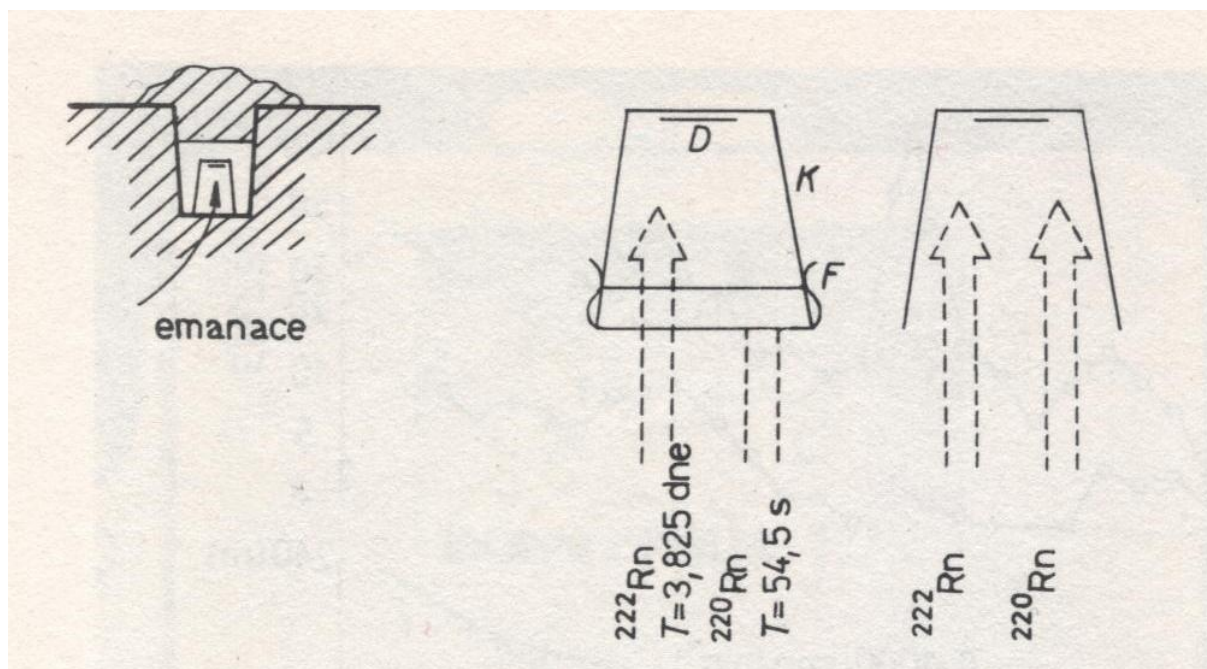
2.3.3.2 Expozičné emanačné metódy

Sú to metódy založené na vystavení (expoziícii) materiálov citlivých na alfa žiarenie jeho pôsobeniu alebo na adsorpcii radónu a produktov jeho rozpadu. V porovnaní s prenosnými emanometrami, tieto metódy neposkytujú okamžité výsledky nakoľko vyžadujú relatívne dlhé časy expoziície, majú zvyčajne nižšiu citlivosť, avšak eliminujú vplyvy časových zmien poľa koncentrácie pôdneho radónu

a problémy súvisiace s odberom pôdneho vzduchu. K týmto metódam patria: metóda stôp alfa častíc, alfametria, metóda alpha card, metóda termoluminiscenčných dozimetrov (TLD) a metóda ROAC.

Metóda stôp alfa častíc

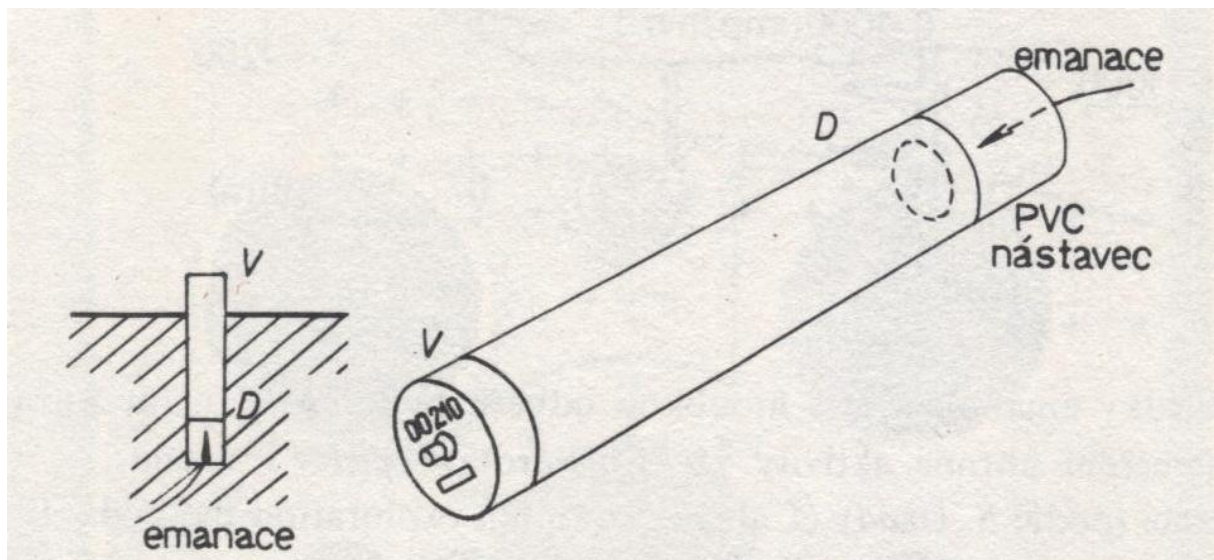
Je založená na účinkoch alfa žiarenia na citlivé fólie. Vzorkovnice jednotného tvaru a objemu s detektorom citlivým na alfa častice sa umiestňujú do vyvrtaných otvorov alebo jamiek do pôdy do hĺbky 0,6 – 1 m na dobu expozície 25 – 30 dní (obr. 44). Dopadajúce alfa častice z rozpadajúceho sa radónu a jeho dcérskych produktov v pôdnom vzduchu vo vzorkovnici poškodzujú citlivý materiál fólie a zanechávajú v ňom stopy. Chemicky, resp. elektrochemicky vyleptané stopy (kvôli ich zväčšeniu a zviditeľneniu) sa spočítavajú pomocou optického mikroskopu a hustota stôp alfa častíc (počet stôp na 1 mm^2 pri expozícii 30 dní) udáva pole koncentrácie emanácie. Ako citlivé materiály sa používajú horninové minerály (sľudy), sklá rozličného zloženia a hlavne fólie z organických polymérov (nitrátcelulóza, triacetátcelulóza a iné) (Titov et al., 1985).



Obr. 44 Schéma merania metódou stôp alfa častíc (K – vzorkovnica, D – detekčná fólia, F – filter) (Mareš et al., 1990)

Alfametria

Je založená na použití prenosných digitálnych meračov alfa aktivity na báze impulzného polovodičového kremíkového detektora (alfametrov). Impulzy vznikajúce v Si detektore účinkom dopadajúcich alfa častíc o energii nad určitú prahovú hranicu sú registrované a ich počty ukladané do elektronickej pamäte. Digitálne alfametre sa umiestňujú do vzorkovnic (obr. 45) podobne ako u metódy stôp alfa častíc, na dobu expozície 0,5 – 3 dni. Počet zaregistrovaných alfa častíc spolu s dobou merania určujú pole koncentrácie emanácie. Detektor ja možné použiť opätovne na meranie po deaktivácii buď cestou prirodzeného rádioaktívneho rozpadu dcérskych produktov radónu alebo premytím dezaktivačným roztokom.



Obr. 45 Schéma merania alfametrom (D – polovodičový detektor alfa žiarenia, V – digitálny výstup údajov meraného signálu a času merania) (Mareš et al., 1990)

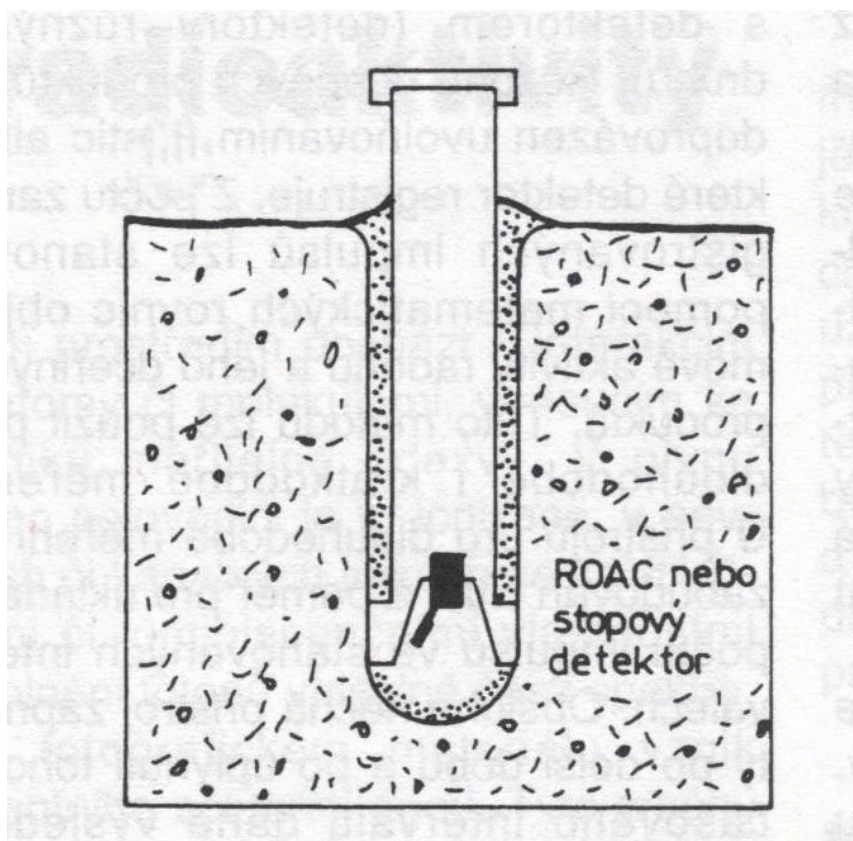
Metóda alpha card

Je založená na meraní alfa aktivity produktov rozpadu radónu adsorbovaných na kolektore (alpha card) umiestnenom vo vzorkovnici do hĺbok 0,6 – 1 m na dobu 24 hodín alebo aj kratšiu (12 hodín), ak má adsorbent väčšiu plochu ($60 - 100 \text{ cm}^2$). Alfa aktivita kolektora sa meria in situ prenosným alfa rádiometrom na báze impulzného polovodičového kremíkového detektora. Počet zaregistrovaných alfa častíc pre jednotnú dĺžku expozície určuje pole koncentrácie emanácie. Ako materiál adsorbenta sa používa meď, polyetylén, drevo, textolit, hliník alebo sklo. Z meraní

opakovaných po 5 hodinách možno zaviesť opravu na účinok torónu. Kolektor je možné použiť opakovane. Metóda je na Slovensku známa aj pod označením SAN (systém (spôsob) aktívneho náletu).

Metóda termoluminiscenčných dozimetrov (TLD)

Je založená na hromadení energie alfa, beta a gama žiarenia špeciálnym detektorom umiestneným vo vzorkovnici v pôdnom prostredí po dobu expozície (obr. 46). Vyhodnotenie spočíva v nahrievaní detektora v meracom bloku pri lineárnom raste teploty s časom, čo spôsobuje uvoľňovanie energie nahromadenej v detektore vo forme svetelných fotónov registrovaných vo fotonásobiči, pričom intenzita svitu je úmerná dávke pohlteneho žiarenia. Ako detektory sa používajú chemické látky označované ako rádiotermoluminofóry – napr. LiF, CaSO_4 (Mn), CaSO_4 (Mn, Pb), CaSO_4 (Dy), BaSO_4 (Eu). LiF (Ca, Mg) detektor má tvar tablety o priemere 10 mm a hrúbke 1 mm. Detektory je možné použiť opakovane.



Obr. 46 Princíp dlhodobého merania koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu (Rosén and Åkerblom, 1989 in Jiránek a Pospíšil, 1993)

Metóda ROAC (Read (Record) On Active Charcoal)

Je založená na adsorpcii radónu na aktívnom uhlí a stanovení gama aktivity jeho produktov rozpadu. Vzorkovnice s aktívnym uhlím sa umiestňujú do pripravených otvorov v pôde na dobu expozície 5 – 8 dní.

Ciachovanie všetkých expozičných metód je možné realizovať v referenčnej radónovej komore, čo umožní prevod meraných veličín na objemovú aktivitu radónu pri použití jednotnej metodiky merania a ciachovania.

LITERATÚRA

- Baranov, V.I., Morozova, N.G., Serdjukova, A.S., Čalov, P.I. a Šaškin, V.L., 1957: Spravočnik po radiometrii dlja geofizikov i geologov. Moskva
- Brož, J., Bakule, R., Havránek, A., Sedlák, B., Holan, P., Fähnrich, J. a Müller, V., 1983: Základy fyzikálních měření. SPN, Praha
- Daniel, J., Lučivjanský, L. a Stercz, M., 1996: Geochemický atlas Slovenska. Časť IV: Prírodná rádioaktivita hornín. Geologická služba SR, Bratislava
- Gruntorád, J., Marek, F., Mareš, S., Matolín, M. a Skopec, J., 1985: Principy metod užitých geofyziky. SNTL/Alfa, Praha
- IAEA-TECDOC-566, 1990: The Use of Gamma Ray Data to Define The Natural Radiation Environment. International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA-TECDOC-1363, 2003: Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency. Vienna
- IAEA-TRS-174, 1976: Radiometric Reporting Methods and Calibration in Uranium Exploration. International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA-TRS-186, 1979: Gamma-Ray Surveys in Uranium Exploration. International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA-TRS-309, 1989: Construction and Use of Calibration Facilities for Radiometric Field Equipment. International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA-TRS-323, 1991: Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. International Atomic Energy Agency, Vienna
- Jiránek, M. a Pospíšil, S., 1993: Radon a dům. ARCH, Praha
- Kogan, R.M., Nazarov, I.M. and Fridman, Sh.D., 1971: Gamma Spectrometry of Natural Environments and Formations. Israel Programme for Scientific Translations.
- Kolektiv autorov, 1979: Směrnice pro řízení, provádění a dokumentaci geofyzikálních průzkumných prací, díl 1. – Radiometrický průzkum, ČSUP Příbram, k.p. Liberec
- Koomans, R.L., Limburg, J. and van der Graaf, E.R., 2008: Towards lightweight airborne gamma spectrometry. A case study. Medusa Systems, Groningen, Netherlands
- Kuznecov, O.L. a Poljačenko, A.L. (red.), 1986: Razvedočnaja jadernaja geofizika. Spravočnik geofizika. Nedra, Moskva

- Lanc, J., 1990: Rádionuklidové metódy a metódy jadrovej geofyziky. Manuskript VŠ skrípt. PriF UK, Bratislava
- Mareš, S., Gruntorád, J., Hrách, S., Karous, M., Marek, F., Matolín, M. a Skopec, J., 1990: Úvod do užité geofyziky. SNTL, Praha
- Mašín, J. a Válek, R., 1963: Přehled užité geofyziky pro geology. SPN, Praha
- Matolín, M., 1989: Nové postupy v geofyzikálních výskumech radioaktivity přírodního prostředí. Dokt. disert. práce. PřF UK, Praha
- Matolín, M., 1994: Stanovení radonového rizika geologického podloží (technické texty). PřF UK, Praha
- Nikodémová, D., 1992: Radón v bytoch a jeho vplyv na zdravie človeka. ÚZV, Bratislava
- Plch, J., 1994: LUK 3R – integrovaný systém pro měření objemové aktivity radonu a thoronu. SMM, Praha
- Poláček, A., 1992: Využití radionuklidových metod pro hodnocení fyzikálního stavu horninového masívu. Kandid. disert. práce. VŠB, Ostrava
- Smernica MŽP SR č. 1/2000-3 zo 4.1.2000 na zostavovanie a vydávanie máp prírodnej a umelej rádioaktivity v mierke 1:50 000
- STN 73 1001 Zakladanie stavieb. Základová pôda pod plošnými základmi.
- Titov, V.K., Venkov, V.A., Avdejeva, T.L. a Kuvšinnikova, E.I., 1985: Ekspozicionnyje emanacijonnyje metody poiskov mestoroždenij poleznych iskopaemych. Nedra, Leningrad
- UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1982: Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects.
- Vyhláška MZ SR 528/2007 Z.z.
- Vyhláška MŽP SR 51/2008 Z.z.

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Prírodné rádioaktívne rozpadové rady ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th a rozpad ^{40}K . Hrubo orámované izotopy sú používané v terénnej a laboratórnej gamaspektrometrii

Obr. 2 Sumárna priemerná depozícia ^{137}Cs na severnej a južnej pologuli

Obr. 3 Emisné spektrá energií primárneho gama žiarenia produktov rozpadových radov ^{238}U , ^{232}Th a draslíka ^{40}K

Obr. 4 Schéma fotoefektu (a), Comptonovho rozptylu (b) a tvorby párov elektrón-pozitrón (c)

Obr. 5 Oblasti dominantnej interakcie gama žiarenia fotoefektom, Comptonovým javom a tvorbou párov elektrón-pozitrón. Z – protónové číslo; E – energia žiarenia

Obr. 6 Normalizovaný tok gama žiarenia 1 m nad povrchom

Obr. 7 Spektrum gama žiarenia nekonečného polpriestoru U rudy rôzneho zloženia

Obr. 8 Prístrojové spektrum K, U, Th namerané detektorom NaI(Tl). Číselné hodnoty uvedené v keV

Obr. 9 K intenzite gama žiarenia a) nekonečného zrezaného kužeľa (trojrozmerné teleso), b) nekonečného polpriestoru a c) nekonečného priestoru. D – poloha detektora.

Obr. 10 Normálne pole a anomália rádioaktivity hornín

Obr. 11 Príspevky gama žiarenia nekonečnej vrstvy lujavritu s homogénnou distribúciou tória. Jednotlivé krivky reprezentujú hranice 10 vrstvičiek, z ktorých každá je zdrojom 10 % žiarenia o energii 2,615 MeV

Obr. 12 Krivky účinnosti detekcie gama detektorov: 1 – scintilačný NaI(Tl) detektor s výškou kryštálu 50 mm, 2 – scintilačný NaI(Tl) detektor s výškou kryštálu 20 mm, 3 – Geiger-Müllerov detektor s W katódou, 4 - Geiger-Müllerov detektor s Cu katódou, 5 - Geiger-Müllerov detektor s Fe katódou

Obr. 13 Schéma stanovenia K, U a Th gamaspektrometriou v teréne: a) prahový gamaspektrometer, b) diferenciálny gamaspektrometer

Obr. 14 Úbytok poľa gama aktivity povrchových zdrojov žiarenia s výškou (a – nekonečná plocha, b – plocha 100 x 200 m, c – plocha 20 x 60 m)

Obr. 15 Vplyv tvaru povrchu Zeme na výsledky leteckých meraní rádioaktivity hornín

Obr. 16 Príspevok gama žiarenia časti nekonečného polpriestoru vo výške h ($2r$ – priemer valcovitého telesa, μ - lineárny koeficient zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu, $\mu = f(E_0)$)

Obr. 17 Príklad plánovaného systému prieskumných profilov

Obr. 18 Centrálna jednotka leteckého geofyzikálneho systému (Pico Envirotec AGIS)

Obr. 19a Príklad mápy profilov starších meraní celkovej gama aktivity hornín

Obr. 19b Príklad mápy profilov starších meraní celkovej gama aktivity hornín

Obr. 20 Príklad mapy izolínií starších meraní celkovej gama aktivity hornín

Obr. 21 Teplotne izolovaný box detektora so 4 hlavnými NaI(Tl) kryštálmi (16,8 l) a 1 NaI(Tl) kryštálom (4,2 l) nad nimi, umiestnený v podvese vrtuľníka (letecký gamaspektrometer Pico Envirotec GRS410)

Obr. 22 LCD panel centrálnej jednotky leteckého systému Pico Envirotec AGIS

Obr. 23 Vrtuľník BELL 206 B s leteckým gamaspektrometrom Pico Envirotec GRS410 so 4+1 NaI(Tl) kryštálmi (21,0 l)

Obr. 24 Príklad kontúrovej mapy surových nameraných údajov celkovej gama aktivity v $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1} = \text{cps}$

Obr. 25 Ukážka finálnych kontúrových máp koncentrácie K, U a Th

Obr. 26 Veľkosť tienenia detektora vozidlom (v %)

Obr. 27 Geometrické podmienky merania prenosnými rádiometrami

Obr. 28 Krivky početností výsledkov merania dvoma rádiometrami na spoločnom profile (K_a – dávkový príkon, 1 – základný prístroj, 2 – radový prístroj)

Obr. 29 Ciachovanie prenosného gamaspektrometra pomocou transportovateľného ciachovacieho štandardu

Obr. 30 Výsledky merania prenosným gamaspektrometrom v oblasti fosfátov lokality Oued Zem v Maroku

Obr. 31 Schéma merania rádiometrom smerového príjmu (A – gama aktivita meraného objektu; B – gama aktivita okolitých zdrojov; D_H , D_K – detektory hlavného a kompenzačného kanálu; M – diferenčné meradlo; P_K – kompenzácia; S – tienenie)

Obr. 32 Krivky doletu alfa častíc v hmotnom prostredí

Obr. 33 Graf závislosti doletu alfa častice od jej energie

Obr. 34 Špecifická ionizácia vo vzduchu pozdĺž dráhy alfa častice

Obr. 35 Schéma vzniku a rozpadu ^{222}Rn a ^{220}Rn . Silnejšie označené rádionuklidy emitujú alfa žiarenie, ktoré sa význačne uplatňuje pri terénnej emanometrii

Obr. 36 Zjednodušená schéma rozpadového radu ^{238}U s dcérskymi produktami radónu

Obr. 37 Permeabilita zemín v m^2

Obr. 38 Nárast objemovej aktivity ^{222}Rn v pôdnom vzduchu s hĺbkou v závislosti od hodnoty zdanlivého koeficientu difúzie hornín

Obr. 39 Scintilačný impulzný emanometer EM-6

Obr. 40 Postupy odberov vzoriek pôdneho vzduchu

Obr. 41 Závislosť alfa aktivity emanácie na čase

Obr. 42 Závislosť relatívnej alfa aktivity ^{222}Rn a produktov jeho rozpadu na čase po vložení emanácie v $t = 0$

Obr. 43 Závislosť relatívnej alfa aktivity ^{220}Rn a produktov jeho rozpadu na čase po vložení emanácie v $t = 0$

Obr. 44 Schéma merania metódou stôp alfa častíc

Obr. 45 Schéma merania alfametrom

Obr. 46 Princíp dlhodobého merania koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu

Zoznam tabuliek

- Tab. 1 Prehľad metód merania prírodnej rádioaktivity a ich použitie v geológii
- Tab. 2 Prehľad metód založených na interakcii jadrového žiarenia s prvkami skúmaného geologického objektu a ich použitie v geológii
- Tab. 3 Prehľad metód založených na aktivácii prvkov skúmaného geologického objektu a ich použitie v geológii
- Tab. 4 Všeobecná postupnosť prieskumných aktivít
- Tab. 5 Šírkový dosah metód gama prieskumu
- Tab. 6 Typické koncentrácie ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th vo vybraných bežných horninách a odpovedajúce hodnoty dávkového príkonu vo vzduchu a expozičného príkonu (vypočítané pre výšku 1 m nad povrchom terénu)
- Tab. 7 Priemerné koncentrácie ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th v pôde a odpovedajúce hodnoty dávkového príkonu vo vzduchu a expozičného príkonu (vypočítané pre výšku 1 m nad povrchom terénu)
- Tab. 8 Typické hodnoty hustoty úhrnného toku gama žiarenia od rozpadových produktov ^{222}Rn v atmosfére za rôznych zmiešavacích podmienok
- Tab. 9 Významné rádionuklidy rádioaktívneho spádu, ktoré sú zdrojmi gama žiarenia
- Tab. 10 Dobeh gama kvánt v betóne
- Tab. 11 Dobeh gama kvánt tória v prírodných materiáloch
- Tab. 12 Koeficienty citlivosti NaI(Tl) detektora 3,81 cm x 2,54 cm ako funkcia energie diskriminačného prahu
- Tab. 13 Citlivosti typických prenosných NaI(Tl) scintilačných detektorov
- Tab. 14 Citlivosti veľkoobjemových leteckých NaI(Tl) scintilačných detektorov
- Tab. 15 Teoretické hodnoty poľa gama žiarenia hornín s jednotkovou koncentráciou rádioaktívneho prvku pri homogénnej distribúcii a geometrii nekonečného polpriestoru $\omega = 2\pi sr$
- Tab. 16 Okná spektrálnej energie zvyčajne používané u terénnych gamaspektrometrov
- Tab. 17 Koeficienty zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu normalizované na hustotu vzduchu $1,293 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ pre letecké aparatury na meranie celkovej gama aktivity

Tab. 18 Približné hodnoty koeficientu zoslabenia gama žiarenia vo vzduchu vztiahnuté na hustotu vzduchu $1,293 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ pre letecké gamaspektrometrické aparatury

Tab. 19 Šírkový dosah automobilového gama detektora, $\mu_{\text{ef}}(\text{vzduch}) = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

Tab. 20 Šírkový dosah prenosného radiometra, $\mu_{\text{ef}}(\text{vzduch}) = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

Tab. 21 Hodnoty r a m pre horniny s hustotou $\rho = 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $h_D = 0 \text{ m}$

Tab. 22 Typické hodnoty citlivostí a stripping pomerov pre prenosný gamaspektrometer s NaI(Tl) detektorom $76 \times 76 \text{ mm}$

Tab. 23 Geometrické korekčné faktory pre transportovateľné ciachovacie štandardy

Tab. 24 Základné charakteristiky izotopov $_{86}\text{Rn}$

Tab. 25 Základné charakteristiky ^{222}Rn a produktov jeho rozpadu

Tab. 26 Základné charakteristiky ^{220}Rn a produktov jeho rozpadu

Tab. 27 Hodnoty koeficientu emanácie hornín

Tab. 28 Kategórie priepustnosti základových pôd podľa podielu jemných častíc f (STN 73 1001)

Tab. 29 Kategórie radónového rizika geologického podlažia

RNDr. Andrej Mojzeš, PhD.

Metodika terénnych geofyzikálnych meraní rádioaktivity hornín

Vedúci katedry: Doc. RNDr. Roman Pašteka, PhD.

Rozsah 113 strán, 4,9 AH, 1. vydanie, <http://www.fns.uniba.sk/index.php?id=3028>

ISBN 978-80-223-3203-3