

Kapitola 6

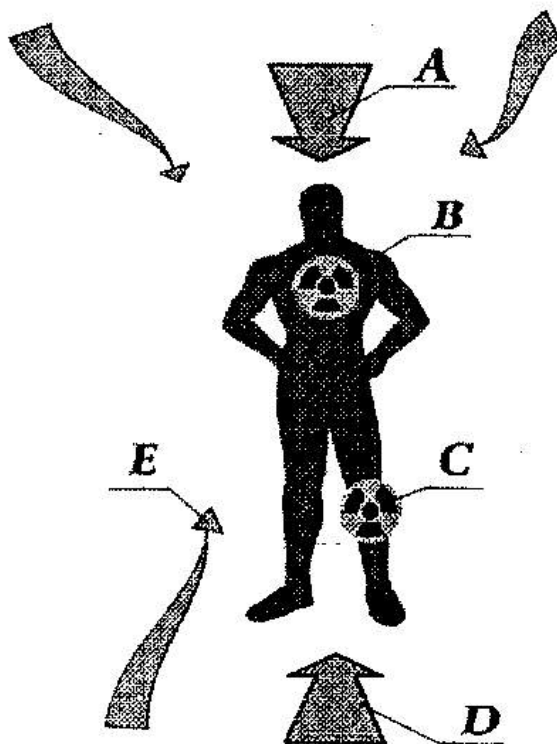
RÁDIONUKLIDOVÉ METÓDY

(RNDr. Andrej Mojzeš, PhD.)

6.1 Rádioaktivita - všade okolo nás a odjakživa	6-1
6.2 Jav rádioaktivity	6-2
6.3 Druhy rádioaktívneho žiarenia	6-4
6.4 Zdroje rádioaktivity	6-7
6.4.1 Zdroje prírodnej rádioaktivity	6-7
6.4.2 Zdroje umelej rádioaktivity	6-8
6.4.3 Štruktúra radiačnej záťaže obyvateľstva	6-8
6.5 Jednotky rádioaktivity	6-10
6.6 Meranie rádioaktivity	6-11
6.7 Prehľad použitia metód merania prírodnej rádioaktivity v geológii (rádiometrické metódy)	6-12
6.8 Prehľad použitia metód založených na interakcii jadrového žiarenia s prvkami geologického objektu (metódy jadrovej geofyziky)	6-13
6.9 Prehľad použitia metód založených na aktivácii prvkov skúmaného geologického objektu (metódy jadrovej geofyziky)	6-14
6.10 Literatúra	6-15
6.11 Otázky ku kapitole	6-15

6.1 Rádioaktivita - všade okolo nás a odjakživa

Teplo a svetlo sú druhmi radiácie (vyžarovania, t.j. prenosu energie), ktoré je človek schopný cítiť alebo vidieť, no existujú aj iné druhy radiácie, ktoré ľudské zmysly nie sú schopné zachytiť. V skutočnosti neustále prijímame takúto neviditeľnú radiáciu z oblohy, zo zeme, zo vzduchu, ba dokonca z nášho jedla a nápojov. Tento druh radiácie - *rádioaktívne žiarenie* - je prítomný všade v našom životnom prostredí. Podľa pôvodu svojich zdrojov (viď kap. 6.4) je možné túto, pre nás v podstate tzv.



Obr. 6.1 Schematické znázornenie pôsobenia rôznych druhov prírodnej rádioaktivity na človeka [1]
(A - kozmické žiarenie, B - vdýchnutý rádioaktívny plyn radón, C - draslík ako súčasť organizmu, D - žiarenie zo zeme, E - radón uvoľnený z hornín)

"rádioaktívnu záťaž", rozdeliť na *prírodnú* a *umelú*.

Prírodné zdroje rádioaktivity sú súčasťou prírodného prostredia a vždy sprevádzali život na Zemi. Najdlhšie žijúce rádioaktívne častice vznikli ešte predtým ako sa sformovala naša planéta, žijú dodnes a preto žiarenie, ktoré produkujú, vždy bolo a je jednak nevyhnutným a jednak normálnym naším rádioaktívnym pozadím.

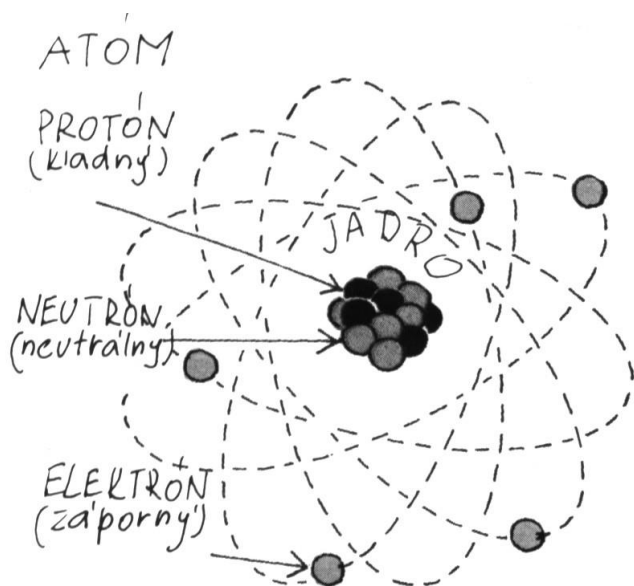
Umelé zdroje rádioaktivity sú výsledkom ľudskej činnosti a sú cudzie živej i neživej prírode. Za posledné storočie sa existujúca prírodná rádioaktivita pozadia v globále veľmi mierne zvýšila v dôsledku takých ľudských aktivít ako skúšky jadrových zbraní a výroba energie v jadrových elektrárňach.

Veľkosť prírodnej aj umelej rádioaktivity je rôzna na rôznych miestach zemského povrchu a mení sa aj v čase, pretože závisí od množstva faktorov, napr. od zloženia zeme (hornín), stavebných materiálov, ročnej doby, zemepisnej šírky, do určitej miery od podmienok počasia a mnohých ďalších faktorov, a to nielen prírodných.

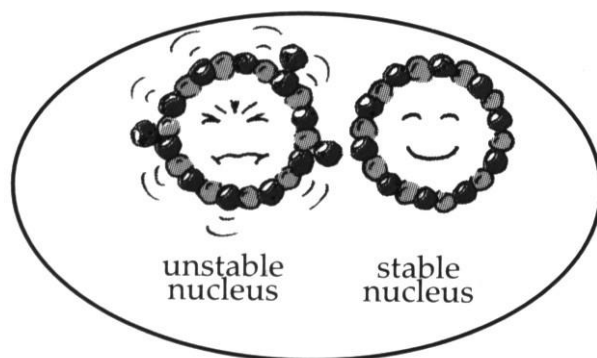
Obe veľké skupiny zdrojov rádioaktivity spôsobujú dvojaké ožiarenie človeka (obr. 6.1): *vonkajšie* (keď je zdroj žiarenia mimo ľudského tela a teda žiarenie prichádza zvonka) a *vnútorné* (keď je zdroj žiarenia vnútri ľudského tela, buď ako jeho prirodzená stavebná zložka alebo sa tam dostal dýchaním alebo požívaním potravy).

6.2 Jav rádioaktivity

Každý živý organizmus i neživá vec sa skladá z atómov rôznych prvkov, napr. telo človeka je budované približne $4 \cdot 10^{27}$ atómami kyslíka, uhlíka, vodíka, dusíka, fosforu, draslíka a iných prvkov.



Obr. 6.2 Schematický model atómu



Obr. 6.3 Princíp stability jadra

Hmotnosť atómu je skoncentrovaná do jadra, ktorého objem je pritom sotva 10^{-11} časťou celkového objemu atómu. Priestor okolo jadra je takmer prázdny okrem malých záporne nabitých častíc - elektrónov (e^-), ktoré ho obiehajú (obr. 6.2). Elektróny určujú chemické správanie sa danej častice. Nemajú nič do činenia s rádioaktivitou. Rádioaktivita je výhradne závislá iba od štruktúry jadra.

Prvok je definovaný počtom protónov (p^+) vo svojom jadre (protónové číslo). Čím väčší je počet protónov, tým ťažšie je jadro. Vodík má 1 protón, hélium 2, lítium 3, ale tórium už má 90 protónov, protaktínium 91 a urán 92. Ťažké prvky s viac ako 92 protónmi sú známe ako transurány. Spolu s protónmi sa v jadre nachádzajú aj nábojovo neutrálne, ale oveľa ťažšie častice - neutróny (n). Ich počet v jadre určuje, či je jadro stabilné alebo nestabilné, teda rádioaktívne. Aby bolo jadro stabilné, počet neutrónov by mal byť rovnaký ako počet protónov. V stabilnom jadre sú protóny a neutróny spolu viazané veľmi silnými dostredivými príťažlivými, tzv. jadrovými silami, takže žiadna z častíc nemôže jadro opustiť. V takom prípade je všetko v poriadku a jadro je v rovnovážnom stave. Problémy nastávajú, ak je počet neutrónov iný ako počet protónov (obr. 6.3). V takom prípade má jadro prebytok energie a jednoducho nie je schopné držať pohromade, pretože odstredivé odpudivé elektrostatické sily medzi protónmi získavajú prevahu nad dostredivými jadrovými silami a je nútené prebytok energie uvoľniť. Táto nestabilita je pozorovaná u jadier atómov s hmotnostným číslom nad 210 a tieto prvky existujú bežne v prírode. Rôzne jadrá uvoľňujú prebytočnú energiu rôznymi spôsobmi, buď vo forme elektromagnetických vĺn alebo tokov rôznych častíc. Tento tok energie sa označuje ako *radiácia* alebo *rádioaktívne žiarenie*. Keďže sa týka jadra aj *jadrové žiarenie*.

Proces, počas ktorého nestabilný atóm uvoľňuje svoj prebytok energie sa označuje ako *rádioaktívny rozpad*. Ľahké jadrá s niekoľkými protónmi a neutrónmi sa stavajú stabilnými po jednom rozpade. Keď sa rozpadáva ťažké jadro, napr. rádia alebo uránu, výsledné jadro môže byť ešte nestabilné, rozpadáva sa ďalej a finálny stabilný stav môže nastať až po mnohých rozpadoch. Takéto postupnosti nestabilných jadier atómov sa označujú ako *rádioaktívne rozpadové rady* a začínajú rozpadom tzv. *materských prvkov* uránu a tória a končia stabilnými jadrami olova, medzi ktorými je množstvo medziproduktov rozpadu, ktoré sa označujú ako *dcérske produkty rozpadu* alebo *potomstvo*. Prírodný rádioaktívny rozpad je dôkazom existencie mnohých rádioaktívnych nuklidov v prírodnom prostredí.

Proces rádioaktívneho rozpadu nestabilných jadier neprebíha rovnakou rýchlosťou u všetkých prvkov. Rýchlosť rozpadu je daná tzv. *polčasom rozpadu*, čo je čas, za ktorý sa rozpadne práve polovica z pôvodného množstva jadier daného prvku. Tento čas je konštantný a

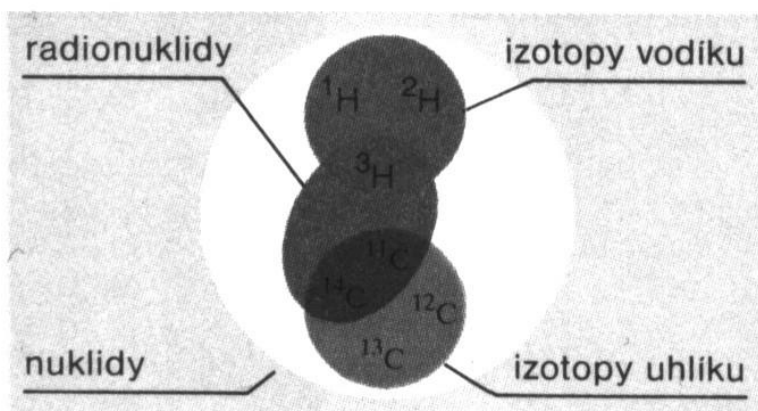
charakteristický pre každý rádionuklid. Polčasy rozpadu pokrývajú veľmi široký časový interval: od najkratších $\sim 10^{-10}$ sekúnd až po najdlhšie $\sim 10^{10}$ rokov. Polčas rozpadu umožňuje stanoviť rádioaktivitu nejakého objektu v určitom čase.

RÁDIOAKTIVITA - je schopnosť (vlastnosť) niektorých látok (prvkov) samovoľne vysielat' neviditeľné žiarenie. Látky (prvky), ktoré túto schopnosť majú sa označujú ako **RÁDIOAKTÍVNE LÁTKY (PRVKY)**.

NUKLID - je prvok zložený z rovnakých atómov, ktoré sú určené počtom protónov a neutrónov. Nuklidy toho istého prvku, ktorých atómy majú rovnaký počet protónov a rôzny počet neutrónov sú **IZOTOPY** tohto prvku (obr. 6.4).

RÁDIONUKLID - je nestabilný (rádioaktívny) nuklid podliehajúci samovoľnej rádioaktívnej premene.

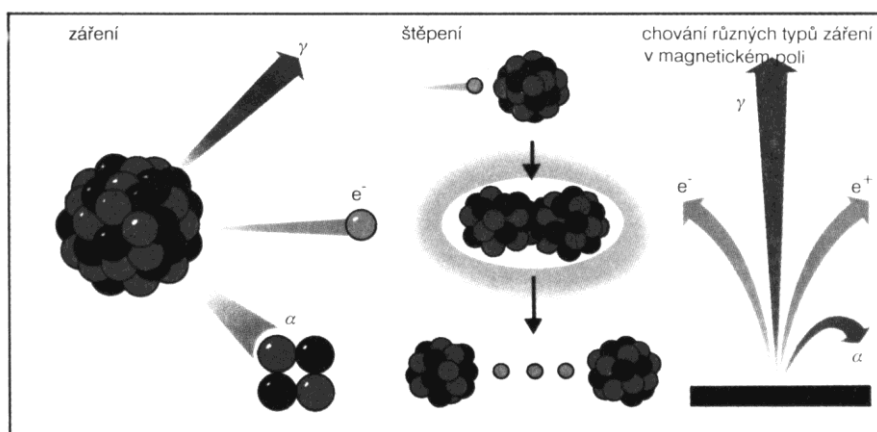
RÁDIOIZOTOP - je nestabilný (rádioaktívny) izotop prvku podliehajúci samovoľnej rádioaktívnej premene.



Obr. 6.4 K vymedzeniu pojmov nuklid a izotop

6.3 Druhy rádioaktívneho žiarenia

Existencia rádioaktívneho žiarenia v našej blízkosti je dôkazom prítomnosti nestabilných

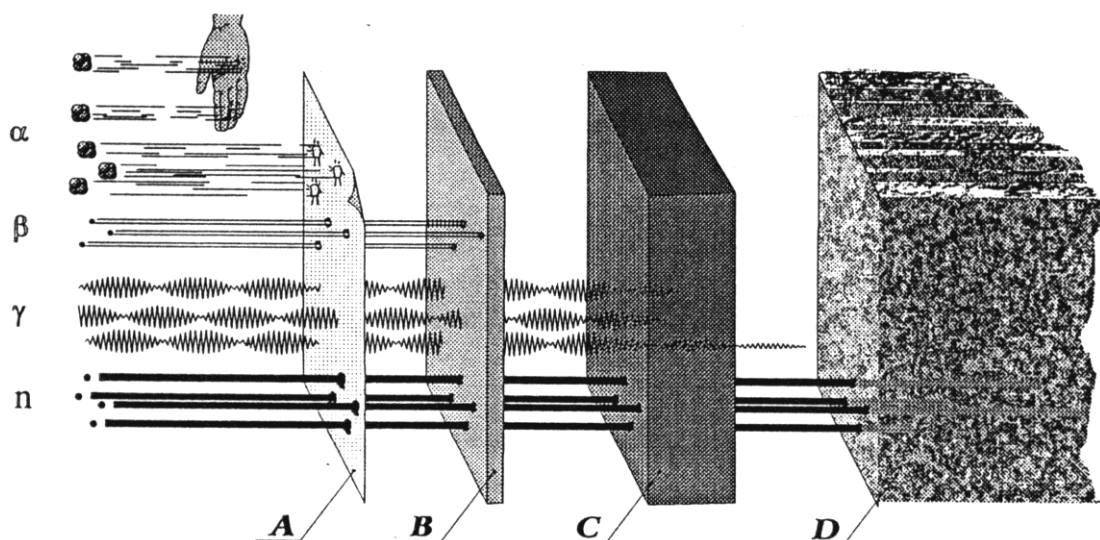


Obr.6.5. Základné charakteristiky rôznych druhov žiarenia

a rozpadávajúcich sa rádioaktívnych látok, ktorých druh a polohu potrebujeme čo najpresnejšie zistiť. Poznanie fyzikálnej podstaty rôznych druhov žiarenia je preto nevyhnutné pre jeho správnu detekciu a pre získanie informácií o množstve a charaktere rádioaktívnej látky. Rádioaktívne žiarenie existuje vo viacerých formách, a síce buď ide o tok častíc (hmotných a prípadne aj elektricky nabitých) alebo o elektromagnetické vlnenie (nehmotné a bez náboja). Z historických dôvodov sa jednotlivé druhy žiarenia označujú α , β , γ (ako boli postupne objavované) a až značne neskôr bola zistená ich podstata (obr. 6.5).

ŽIARENIE α - je to prúd (tok) kladne nabitých častíc - jadier hélia ${}^4_2\text{He}^{2+}$, ktoré majú relatívne veľkú hmotnosť a náboj a preto majú silné *ionizačné schopnosti*, t.j. schopnosti rozbiť neutrálne molekuly plynov vo vzduchu na vodivé ióny. Zastavuje ho však už list papiera alebo pokožka (obr. 6.6), preto látky, ktoré vyžarujú toto žiarenie (α -žiarice), sú pre živé tkanivá nebezpečné až keď sú prehltnuté alebo vdýchnuté do tela.

ŽIARENIE β - je to prúd záporne (kladne) nabitých elektrónov e^- (pozitrónov e^+), ktoré sú ľahšie a majú menší náboj ako častice α , preto majú naopak väčšiu schopnosť prieniku hmotou a zastaví ich tenká vrstva vody, skla alebo kovu (hliník) (obr. 6.6). Ale vnútri tela sú taktiež veľmi nebezpečné.

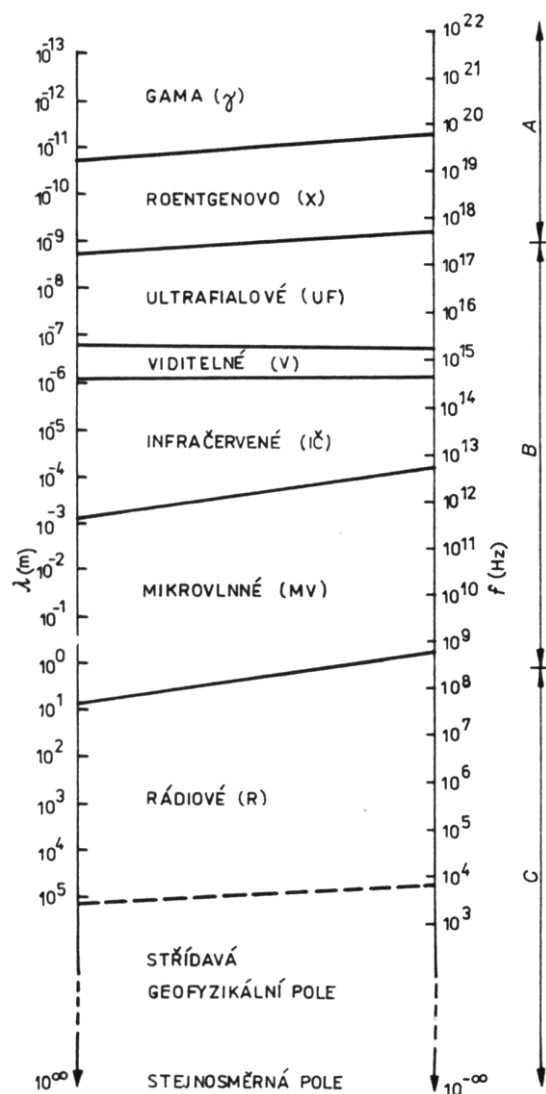


Obr. 6.6 Schematické znázornenie prieniku rôznych druhov rádioaktívneho žiarenia hmotou [1]
(A - papier, B - hliník, C - olovo, D - betón)

ŽIARENIE γ A RÖNTGENOVE ŽIARENIE (X-LÚČE) - nie je to žiarenie časticové. Sú to elektromagnetické vlny podobné svetlu a rádiovým vlnám, ale majú kratšie vlnové dĺžky a vyššie frekvencie (obr. 6.7). Nemajú elektrický náboj, pohybujú sa rýchlosťou svetla. Majú vysokú priechodnosť hmotou a dajú sa zastaviť resp. zoslabiť vrstvou olova alebo betónu (obr. 6.6).

NEUTRÓNOVÉ ŽIARENIE - sú to častice bez elektrického náboja a s určitou hmotnosťou, čo im umožňuje ľahký prechod materiálmi. Neionizujú prostredie priamo, ale svojou interakciou s atómami hmoty dávajú príčinu vzniku α , β , γ a X-lúčom, ktoré uskutočňujú ionizáciu. Tok neutrónov sa dá zastaviť až hrubými vrstvami betónu, vody alebo parafínu (obr. 6.6).

Tieto druhy rádioaktívneho žiarenia sa označujú aj ako *ionizujúce žiarenie*, pričom žiarenia α a β sú priamo ionizujúce a žiarenie γ , röntgenove a neutrónové žiarenie sú nepriamo ionizujúce.



Obr. 6.7 Spektrum elektromagnetického žiarenia [6]

(A, C - oblasť geofyzikálnych metód v užšom slova zmysle, B - oblasť metód diaľkového snímkovania)

6.4 Zdroje rádioaktivity

6.4.1 Zdroje prírodnej rádioaktivity

K prírodným zdrojom rádioaktivity patrí:

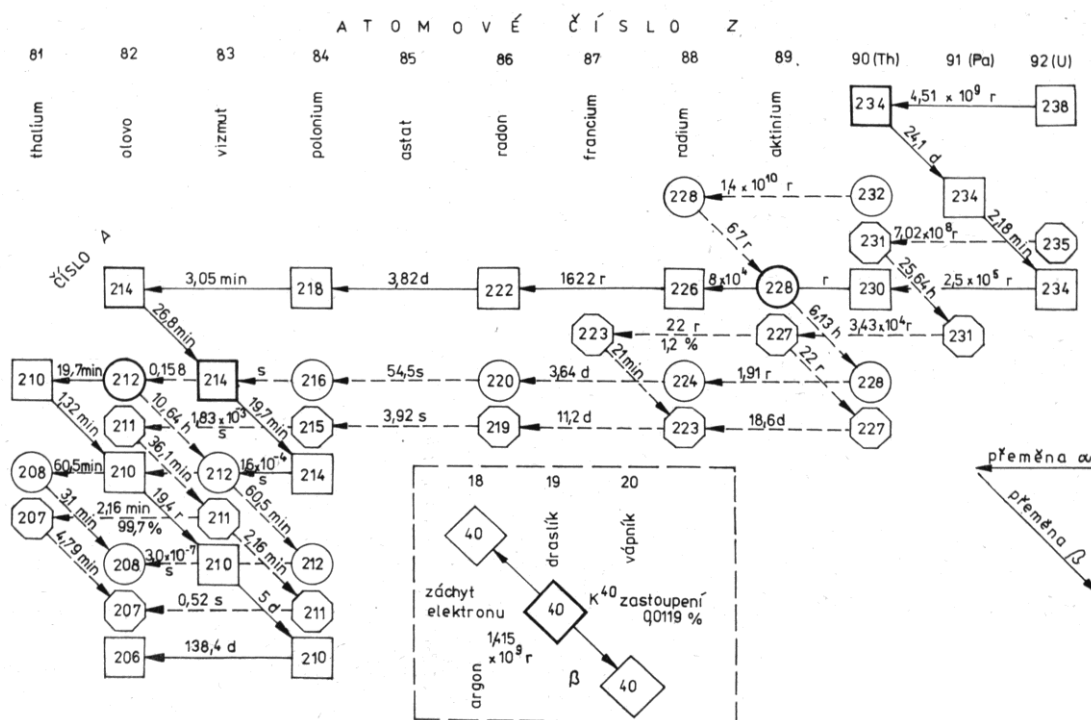
A) prírodná rádioaktivita hornín, hydrosféry a atmosféry, ktorá pochádza od dvoch druhov rádionuklidov:

1. primárnych (obr. 6.8), a to:

a) ^{40}K , ^{48}Ca , ^{87}Rb , ^{96}Zr , ^{147}Sm a ďalšie, ktoré netvoria rozpadové rady. Vzhľadom k prítomnosti v horninách, množstvu a aktivite je najdôležitejším draslík.

b) rozpadových produktov rozpadových radov materských prvkov ^{238}U (tzv. uránový rozpadový rad) a ^{235}U (tzv. aktinouránový rozpadový rad). Rady končia stabilnými izotopmi olova ^{206}Pb a ^{207}Pb .

c) rozpadových produktov rozpadového radu materského prvku ^{232}Th (tzv. tóriový rozpadový rad), ktorý končí stabilným ^{208}Pb .



Obr. 6.8 Přírodní radioaktivní rozpadové rady ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th a rozpad ^{40}K [2]
(označení polčasov rozpadu: r - roky, d - dni, min - minúty, s - sekundy)

2. kozmogénnych, ktoré vznikajú interakciou kozmického žiarenia s atómami prvkov v atmosfére (napr. ^{14}C , ^3H a iné)

B) kozmické žiarenie, ktoré predstavuje prúd (tok) rôznych ľahkých nabitých častíc (α , p) vysokých energií a je možné ho rozčleniť na:

1. primárne kozmické žiarenie:

a) galaktické, pochádzajúce z našej galaxie a

b) slnečné (solárne) žiarenie

2. sekundárne kozmické žiarenie vznikajúce interakciou primárneho kozmického žiarenia so zložkami atmosféry, pričom vznikajú všetky dnes známe elementárne častice.

Kozmické žiarenie je detekované spoločne s inými druhmi žiarenia na Zemi.

Z celkového počtu asi 230 známych prírodných rádionuklidov podstatná časť rádioaktivity pochádza najmä od rádionuklidov draslíka ^{40}K , uránu ^{238}U a tória ^{232}Th .

K dodatočným zdrojom prírodnej rádioaktivity je možné z hľadiska hodnotenia kvality životného prostredia zaradiť ďalšie dva zdroje:

- žiarenie rozpadových produktov rádioaktívnych plynov (izotopov radónu $^{219,220,222}\text{Rn}$), ktoré po svojom vzniku v rozpadových radoch ^{235}U , ^{232}Th a ^{238}U unikli z horniny do ovzdušia a

- rádioaktivitu stavebných materiálov.

6.4.2 Zdroje umelej rádioaktivity

Zdrojmi umelej rádioaktivity sú umelé rádionuklidy. Vznikajú pôsobením neutrónov (n), nabitých častíc (p, α , d) a gama žiarenia na atómy inak stabilných prvkov alebo pri štiepení jadier ťažkých prvkov. V súčasnosti je známych asi 800 umelých rádionuklidov, ktoré vznikajú pri jadrových výbuchoch a regulovaných procesoch ožarovania prvkov v jadrových generátoroch a reaktoroch. Mnohé z nich sú široko využívané v rôznych oblastiach, napr. v medicíne, energetike, potravinárstve, atď.. Bežne sú využívané ako zdroje žiarenia alfa napr. ^{238}Pu a ^{239}Pu , ako zdroje žiarenia beta napr. ^{14}C a ^{204}Tl a ako zdroje gama žiarenia napr. ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{60}Co a iné.

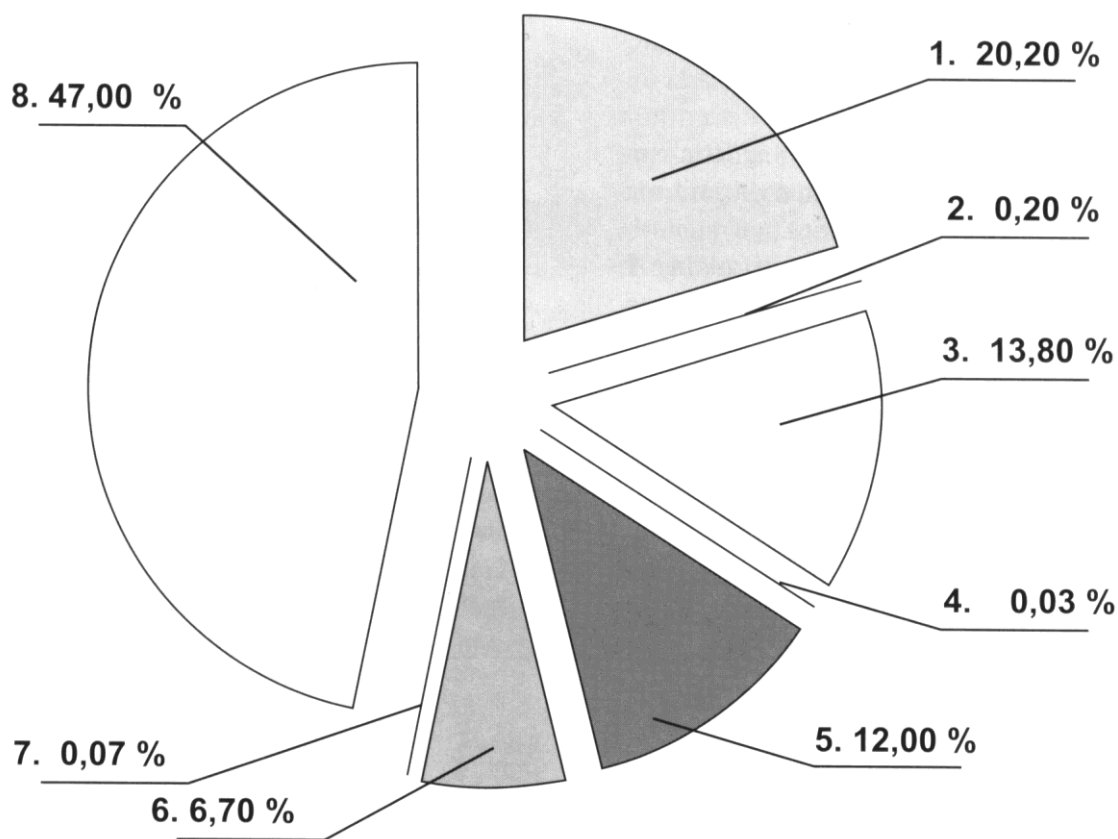
Oblasti vzniku, resp. použitia umelých rádionuklidov: lekárska diagnostika, banská činnosť, prevádzka elektrární na fosílné palivá, jadrová energetika a činnosť spätá s palivoenergetickým cyklom rádioaktívnych surovín, skúšky jadrových zbraní, umelé hnojivá, použitie rádionuklidov v priemysle, poľnohospodárstve, potravinárstve, atď.

6.4.3 Štruktúra radiačnej záťaže obyvateľstva

Z veľkého množstva celosvetových meraní rádioaktivity prírodného a životného prostredia bolo možné stanoviť základné rozdelenie hlavných zdrojov žiarenia, ako sú znázornené v tab. 6.1 a na obr. 6.9.

Tab. 6.1 Príspevky z hlavných prírodných zdrojov žiarenia [1]

zdroj ožiarenia	vonkajšie ožiarenie [%]	vnútorné ožiarenie [%]	spolu [%]
kozmicke žiarenie	17		17
kozmogénne rádionuklidy		1	1
primárne rádionuklidy			
K-40	6	7	13
rozkpadový rad U-238	4	51	55
rozkpadový rad Th-232	7	7	14
spolu	34	66	100



Obr. 6.9 Základné rozdelenie hlavných zdrojov žiarenia [1]

(1 - ožiarenie v zdravotníckych zariadeniach, 2 - ožiarenie z iných zdrojov, 3 - ožiarenie zo Zeme, 4 - ožiarenie z jadrových elektrární, 5 - ožiarenie z vesmíru, 6 - ožiarenie z telesných tkanív, 7 - ožiarenie na pracovisku, 8 - ožiarenie z radónu)

Z nich vyplýva, že najväčšia časť rádioaktívneho žiarenia dopadajúceho na človeka pochádza z horninového prostredia (takmer 50 % z radónu a asi 60 % spolu z radónu a hornín), čo stavia pred geofyzikov veľmi dôležitú úlohu merania rádioaktivity horninového prostredia za

účelom jej podrobného vymapovania s cieľom vyhnúť sa v ľudských aktivitách oblastiam, kde je zvýšená alebo enormne vysoká.

6.5 Jednotky rádioaktivity

Veličiny jadrovej fyziky sa vyjadrujú v jednotkách medzinárodnej sústavy SI. Najzákladnejšie z nich uvádza tab. 6.2.

Tab. 6.2 Jednotky SI pre žiarenie [3]

Veličina	Symbol	Jednotka	
		názov	značka
aktivita	A	becquerel	Bq
expozícia (ožiarenie)	X	coulomb na kg	C/kg
expozičný príkon	$\dot{X}$	ampér na kg	A/kg
dávka	D	gray	Gy
dávkový príkon	$\dot{D}$	gray za sekundu	Gy/s
dávkový ekvivalent	H	sievert	Sv
príkon dávkového ekvivalentu	$\dot{H}$	sievert za sekundu	Sv/s

Aktivita 1 Bq znamená rozpadovú rýchlosť, keď sa 1 atóm rozpadne za 1 s.

Expozícia (ožiarenie) ionizujúcim žiarením je určená množstvom ionizácie vo vzduchu, t.j. množstvom nabitých iónov vo vzduchu, ktoré vznikli rozpadom pôvodne neutrálnych molekúl plynov vplyvom žiarenia.

Expozičný príkon je ožiarenie získané za jednotku času ($\dot{X} = X/t$).

Dávka charakterizuje množstvo energie, ktoré prijme hmota, ak na ňu dopadne žiarenie.

Dávkový príkon je dávka získaná za jednotku času ($\dot{D} = D/t$).

Dávkový ekvivalent je ekvivalent absorbovaného ľubovoľného žiarenia vzhľadom na škodlivé účinky na živé tkanivo.

Príkon dávkového ekvivalentu ja dávkový ekvivalent získaný za jednotku času ($\dot{H} = H/t$).

Na vyjadrenie rádioaktivity hornín sa najčastejšie používajú jednotky expozičného príkonu $\dot{X}$ [A/kg] a dávkového príkonu $\dot{D}$ [Gy/s].

Okrem toho sa rádioaktivita prírodných materiálov (hornín, tekutín, plynov) často vyjadruje množstvom (koncentráciou) rádioaktívnych prvkov v nich obsiahnutých v % alebo jednotkách *ppm* (parts per million) ($1 \text{ ppm} = 10^{-4} \%$) (nie sú to jednotky SI).

6.6 Meranie rádioaktivity

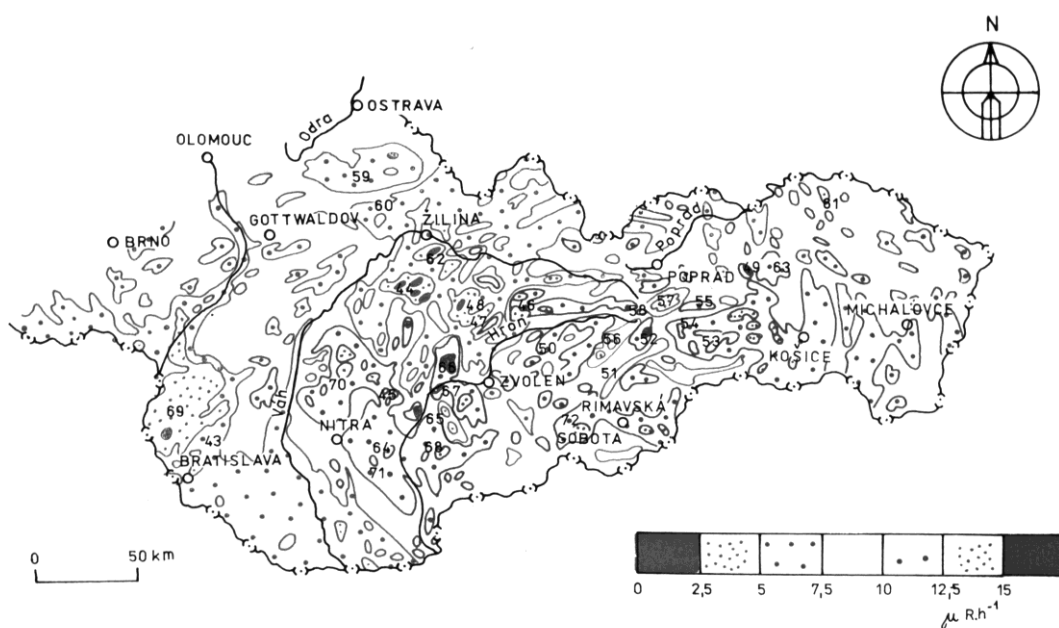
Na meranie rádioaktivity pre geologické účely sa využíva množstvo metód označovaných súhrnne ako *rádionuklidové metódy*. Využívajú premeny jadier atómov, jadrové žiarenie a pôsobenie jadrového žiarenia na hmotu. Dajú sa rozdeliť na dve veľké skupiny, a to:

A) *metódy merania prírodnej rádioaktivity (rádiometrické metódy)*, ktoré kvalitatívne a kvantitatívne stanovujú prítomnosť prírodných rádioaktívnych prvkov v horninách, vodách a vzduchu a

B) *metódy merania vybudených polí jadrového žiarenia (metódy jadrovej geofyziky)*, ktoré využívajú pôsobenie zdrojov jadrového žiarenia na skúmané geologické objekty a umožňujú stanovenie obsahov prvkov a fyzikálnych vlastností hornín.

Podľa typu detekovaného jadrového žiarenia sa rádionuklidové metódy delia na *metódy alfa, beta, gama a neutrónové*.

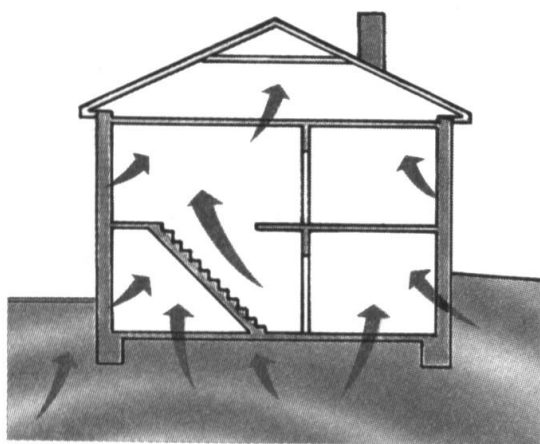
Podľa podmienok merania sa rádionuklidové metódy delia na *metódy laboratórne a metódy terénne*, ktoré môžu byť *letecké, automobilové, pešie, vrtné, banské* a *merania na morskom dne*.



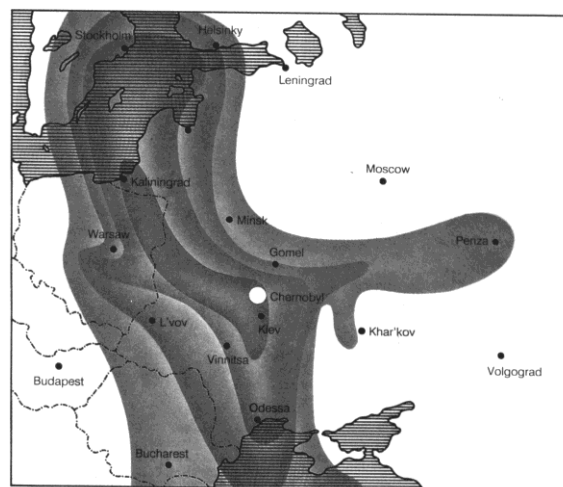
Obr.6.10 Mapa rádioaktivity hornín Západných Karpát (M.Matolín – M.Manová in [5]). Zostavené v r. 1973 podľa výsledkov leteckých, automobilových, peších a laboratórnych rádiometrických meraní. Expozičný príkon žiarenia gama hornín je vyjadrený v $\mu\text{R/h}$ (mikroröntgénov za hodinu).

Na meranie jadrového žiarenia α , β , γ , n sa používajú *rádiometrické prístroje*. Ich najdôležitejšou časťou sú *detektory*, ktoré sú citlivé na určité žiarenie a v nich nastáva premena energie žiarenia na elektrické veličiny (napätie, prúd, náboj, ...), ktoré sa následne spracovávajú a vyhodnocujú na elektrických obvodoch prístroja.

Rádionuklidové metódy majú široké uplatnenie napr. pri geologickom mapovaní (obr. 6.10), vyhľadávaní a prieskume ložísk nerastných surovín, v hydrogeológii a inžinierskej geológii, v prevádzke baní a úpravni a pri hodnotení kvality životného prostredia (obr. 6.11 a 6.12).



Obr. 6.11 Schematické znázornenie zdrojov radónu v stavbách [8]



Obr. 6.12 Šírenie rádioaktívneho znečistenia v ovzduší po havárii reaktoru v Černobyle [8]

6.7 Prehľad použitia metód merania prírodnej rádioaktivity v geológii (rádiometrické metódy)

Metóda	Podmienky	Použitie, fyzikálny parameter, prvok (hranica stanoviteľnosti)
úhrnná aktivita α	laboratórium	Ra v horninách (10^{-12} g/g) a vodách ($1,85 \cdot 10^{-2}$ Bq/l)
emanometria (detekcia α žiarenia)	laboratórium terén – povrch	^{222}Rn (1 Bq/l), ^{220}Rn , mapovanie, eU (ppm), eTh (ppm)

spektrometria α	laboratórium	kvalitatívne a kvantitatívne stanovenie členov prírodných rozpadových radov, rádioaktívna rovnováha, emanovanie hornín
úhrnná aktivita β	laboratórium	úhrnná aktivita β hornín (ppm eU)
beta - gama	laboratórium	U, Ra, Th (1 – 20 ppm eU)
úhrnná aktivita γ	laboratórium terén – povrch	U+Th+K v horninách (0,1 ppm eU) U+Th+K v horninách (ppm eU), mapovanie, vyhľadávanie rádioaktívnych surovín a K solí, rádiometrické vzorkovanie
spektrometria γ	laboratórium terén – povrch	U (0,9 ppm eU), 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	laboratórium	štúdium hornín, datovanie pomocou ^{14}C a ^3H , hydrogeológia
autorádiografia	laboratórium	centrá rádioaktivity v horninách, genéza hornín

6.8 Prehľad použitia metód založených na interakcii jadrového žiarenia s prvkami geologického objektu (metódy jadrovej geofyziky)

Metóda	Podmienky	Použitie, fyzikálny parameter, prvok (hranica stanoviteľnosti)
odrazené žiarenie β	laboratórium	Z_{ef} (dif. 0,1 – 0,3), popolnatosť uhlí, obsah Fe v železných rudách
gama-gama hustotná gama-gama selektívna	terén - povrch laboratórium, terén – povrch	ρ (dif. 10^{-2} – $10^{-1} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), stavebná a inžinierska geológia celkový obsah ťažkých prvkov

röntgen-fluorescenčná	laboratórium terén – povrch	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	laboratórium terén – povrch	Fe, Sn, Zn, Te, W, Pt – za nízkych teplôt, Sn (0,01 %) a Fe (1 %) pri izbovej teplote, štúdium mikrostavby minerálov Fe Sn (0,1 %)
gama-neutrón	laboratórium, terén - povrch	Be (1 ppm)
neutrón-neutrón	laboratórium terén – povrch	B (0,01 %), Cd (0,01 %), Li, Au, Ag, In, Re, Rh, Ir, Ta, Co, U, TR objemová vlhkosť (dif. 0,1 – 10 kg $H_2O \cdot m^{-3}$), inžinierska geológia, B (0,01 % B_2O_3)
neutrón-gama	laboratórium	Ni (0,2 %), Fe (0,5 %), Cr (0,5 – 1 %), S (0,2 – 1 %), Ca (1 – 5 %)
opozdené neutróny	laboratórium	štiepiteľné prvky (ppm)
stopy štiepných produktov	laboratórium	U (10^{-6} ppm), Th, B (ppm), Li (10 ppm), mikrodistribúcia štiepných prvkov, geochronológia

6.9 Prehľad použitia metód založených na aktivácii prvkov skúmaného geologického objektu (metódy jadrovej geofyziky)

Metóda	Podmienky	Použitie, fyzikálny parameter, prvok (hranica stanoviteľnosti)
neutrónová aktivačná analýza	laboratórium terén – povrch	reaktorová: stredne ťažké a ťažké prvky (10^{-7} – 10^{-12} g) generátorová: stredne ťažké a ťažké prvky (10^{-2} – 10^{-6} g) izotopová: Al (5 %), Mn (0,01 %), V (0,1 %), In (0,01 %), F, Si zosilňovač neutrónového toku: stredne ťažké a ťažké prvky (10^{-2} – 10^{-7} g)

		izotopová: Cu (0,2 – 0,4 %), F (5 % CaF ₂)
gama aktivačná analýza	laboratórium	väčšina prvkov včítane ľahkých (10^{-7} – 10^{-10} g)

6.10 Literatúra

1. DANIEL, J. a kol.: Geochemický atlas Slovenska. Časť IV. - Prírodná rádioaktivita hornín. GS SR, Bratislava, 1996
2. GRUNTORÁD, J. a kol.: Principy metod užité geofyziky. SNTL/Alfa, Praha, 1985
3. IAEA: The use of gamma ray data to define the natural radiation environment. Vienna, 1990
4. IAEA: Radiation Safety. Vienna, 1996
5. IBRMAJER, J. a kol.: Geofyzikální obraz ČSSR. ČSAV, Praha, 1989
6. MAREŠ, S. a kol.: Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii. SNTL/Alfa, Praha, 1983
7. MAREŠ, S. a kol.: Úvod do užité geofyziky. SNTL, Praha, 1990
8. PRÁŠIL, Z. a kol.: Užitečné záření. Nuklin, Praha, 1991
9. WAHLSTRÖM, B.: Radiation, Health and Society. IAEA, Vienna, 1997

6.11 Otázky ku kapitole

1. Čo je to rádioaktivita a rádioaktívne látky (prvky)?
2. Čo je to rádioaktívny rozpad a rádioaktívne žiarenie?
3. Vymenujte druhy rádioaktívneho žiarenia.
4. Stručne popíšte jednotlivé druhy rádioaktívneho žiarenia.
5. Akého druhu sú zdroje rádioaktivity a aké ožiarenie človeka spôsobujú?
6. Čo patrí k prírodným zdrojom rádioaktivity?
7. V ktorých oblastiach ľudskej činnosti vznikajú, resp. sú využívané umelé rádionuklidy?
8. Definujte jednotku aktivity rádioaktívneho žiarenia.
9. Aké iné jednotky okrem jednotiek sústavy SI sa ešte používajú na vyjadrenie rádioaktivity prírodných materiálov?
10. Ako sa volajú metódy a prístroje, ktoré sa používajú na meranie rádioaktivity pre geologické účely?
11. Ktoré druhy rádioaktívneho žiarenia sú priamo a ktoré nepriamo ionizujúce?
12. Vymenujte aspoň 4 veličiny sústavy SI (+ jednotky), ktoré sa používajú na vyjadrenie rádioaktivity.
13. Vymenujte aspoň 5 rádiometrických metód.
14. Vymenujte aspoň 5 metód jadrovej geofyziky.