

Rozvoj použití *metod jaderné geofyziky* je úzce spjat s vývojem techniky detekce jaderného záření. Studium jevů jaderného záření a scintilace z počátku dvacátého století, návrh počítače alfa částic realizovaný Rutherfordem a Griperem r. 1908, konstrukce Geigerova—Müllerova počítače r. 1928 a snaha o stanovení radioaktivity hornin vedly k sestavení prvních přenosných měřičů radioaktivity po r. 1930. Roku 1934 byla I. a F. J. Curieovými objevena umělá radioaktivita. Velký rozmach průzkumu uranu po r. 1945 podmínil rozvoj terénních přístrojů: roku 1947 byla v SSSR, USA a Kanadě realizována prvá letecká měření radioaktivity hornin, v padesátých letech se rozvíjí spektrometrie gama záření se scintilačními počítači, koncem šedesátých let jsou konstruovány moderní letecké a pozemní gama spektrometry, v sedmdesátých letech se uplatňuje technika polovodičových detektorů pro měření ve vrtech a intenzivně se prosazuje automatizace zpracování naměřených dat.

*Radionuklidové metody* využívají přeměn jader atomů, jaderného záření a jeho působení na hmotu. Při použití v oboru geologie je dělíme na metody zabývající se měřením *přírozené radioaktivity hornin* (často označované jako radiometrické metody) a na metody využívající *vzbuzená pole jaderného záření* (metody jaderné geofyziky). *Radiometrické metody* umožňují kvalitativní a kvantitativní stanovení přírodních radioaktivních prvků v horninách, vodách a vzduchu. *Metody jaderné geofyziky*, využívající působení umělých zdrojů jaderného záření na zkoumané geologické objekty, umožňují stanovení obsahu prvků a fyzikálních vlastností hornin.

Podle typu detekovaného jaderného záření se radionuklidové metody dělí na *metody alfa, beta, gama a neutronové*.

Radionuklidové metody se uplatňují při geologickém mapování, vyhledávání a průzkumu ložisek nerostných surovin, v hydrogeologii, při řešení inženýrskogeologických problémů a v provozu dolů a úpraven. Jaderné záření zkoumaných přírodních objektů se měří z letadel, automobilů, pomocí ručních přenosných přístrojů, ve vrtech, v dolech, na mořském dně a v laboratořích.

## 6.1 Fyzikální základy radionuklidových metod

Znalost vzniku jaderného záření, jeho vlastností a způsobu interakce s hmotou umožňuje výklad naměřených hodnot při studiu geologických objektů.

### 6.1.1 Stavba hmoty, jaderné přeměny a radioaktivita

Atomy prvků se skládají z *jádra a elektronového obalu*. Jádro je tvořeno protony a neutrony, elektrony se pohybují na elektronových sférách označovaných K, L, M, N, O, P, Q. Elementární náboj nabitých částic je  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C. Izotopy prvků označujeme symboly  ${}^A_ZX$ , kde  $A$  je hmotnostní číslo prvku a  $X$  chemický symbol prvku.  $Z$  je atomové číslo prvku.

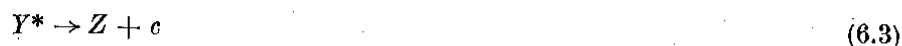
*Přeměny jader atomů* vznikají působením externího záření na atomy hmoty nebo v důsledku vnitřní nestability jader atomů. Dopadají-li částice  $a$  na jádra  $X$  atomů, tvoří se jádra  $Y$  a uvolňují částice  $b$ ,



reakci lze zapsat  $X(a, b) Y$ . Pravděpodobnost vzniku interakce jaderného záření s hmotou vyjadřuje účinný průřez  $\sigma$  (cm<sup>2</sup>) reakce daného typu. Pro energie částic  $E_a \leq 10$  MeV je přeměna obvykle uskutečněna v posloupnosti



při které vzniká vzbuzené jádro atomu  $Y^*$ . Jeho přechod na stabilní energetickou úroveň může být okamžitý (6.2) nebo postupný; v druhém případě se jádra  $Y^*$  přeměňují podle



a mluvíme o *umělé radioaktivitě*. Nacházejí-li se jádra  $Y^*$  v přírodě, označujeme přeměny podle (6.3) jako *přirozenou radioaktivitu*.

Přeměny jader  $Y^*$  atomů jsou provázány emisí částic ( $b, c$ ) nebo energie, takzvaným jaderným zářením; takové prvky označujeme jako radioaktivní. Typy přeměn jsou: *alfa, beta, záchyt elektronu a dělení jader*.

Zákon radioaktivního rozpadu vyjadřuje závislost úbytku počtu atomů  $N$  radioaktivního prvku na čase  $t$

$$N_t = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (6.4)$$

kde  $N_t, N_0$  jsou počty atomů prvku v časech  $t$  a  $t = 0$ ,  $\lambda$  (s<sup>-1</sup>) je rozpadová konstanta prvku charakterizující rychlost rozpadu. Poločas rozpadu  $T$  (s) je doba, za kterou se rozpadne z počátečního množství radionuklidu jedna polovina.

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (6.5)$$

Za dobu  $5T$  zbude 3 % výchozího množství radionuklidu, za  $7T$  1 %, za  $10T$  0,1 %.

### 6.1.2 Přirozené a umělé radionuklidy

Mezi *přirozené radionuklidy* patří členy přirozených radioaktivních rozpadových řad. Rozpadové řady se nazývají podle svých mateřských prvků <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th (obr. 41). Zůstávají-li členy rozpadové řady v přírodních objektech na místě, vzniká mezi nimi *radioaktivní rovnováha*. Za podmínek  $\lambda_1 \rightarrow 0$ ,  $\lambda_1 \ll \lambda_i$  vzniká mezi mateřským prvkem ( $i = 1$ ) a jeho produkty rozpadu ( $i = 2, 3, 4, \dots$ ) *trvalá radioaktivní rovnováha* určená vztahem

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \lambda_i N_i. \quad (6.6)$$

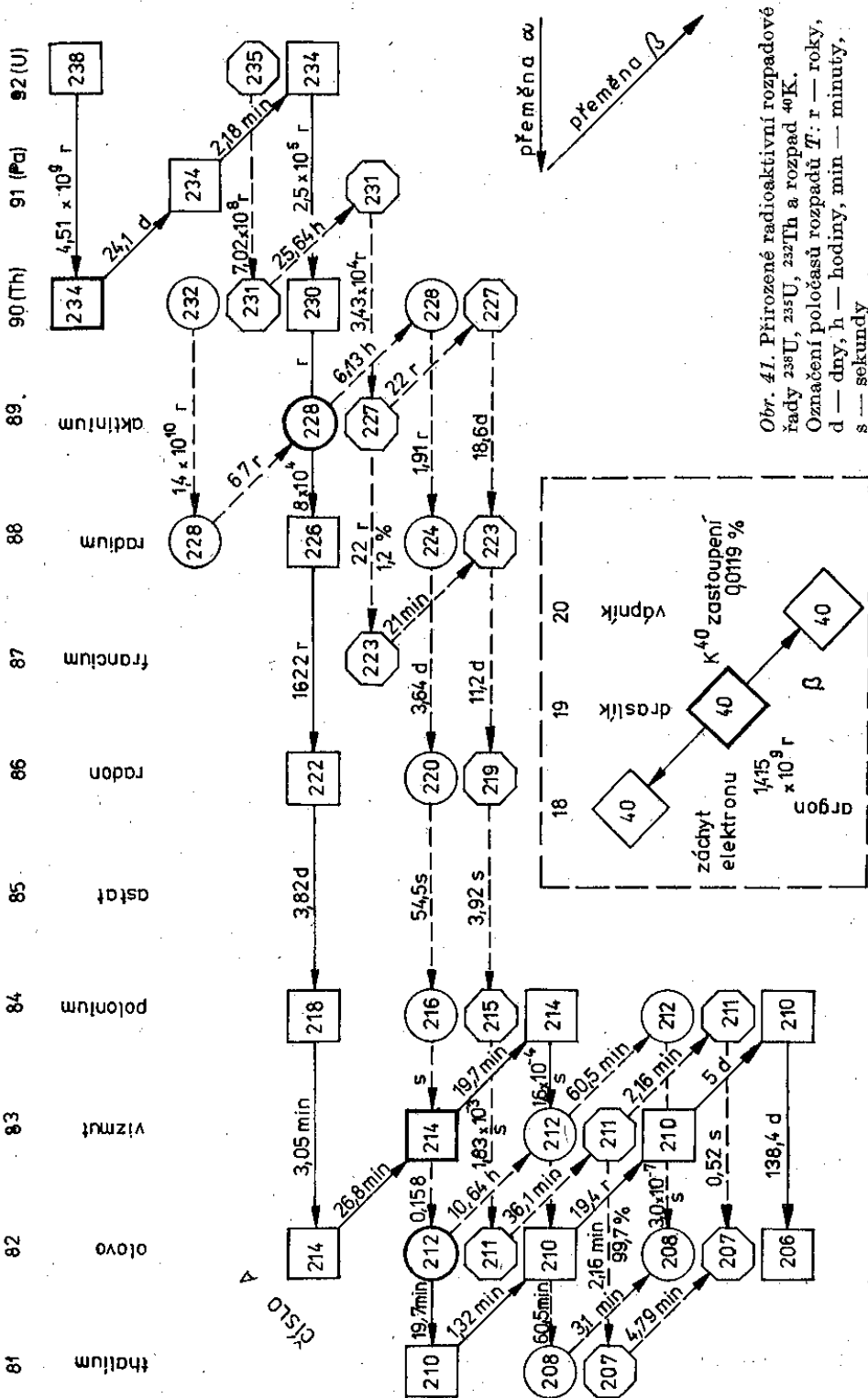
V řadě <sup>238</sup>U je za stavu trvalé radioaktivní rovnováhy důležitý poměr hmot <sup>238</sup>U a <sup>226</sup>Ra

$$m_U : m_{Ra} = 1 : 3,4 \cdot 10^{-7}. \quad (6.7)$$

V přírodním prostředí může být vlivem rozdílné rozpustnosti a transportu členů řady radioaktivní rovnováha porušena. Stav charakterizuje koeficient radioaktivní rovnováhy určený z experimentálně stanovených hodnot  $m_U$  a  $m_{Ra}$ :

$$k_{rr} = \frac{m_{Ra}}{m_U 3,4 \cdot 10^{-7}}. \quad (6.8)$$

A T O M O V É Č Í S L O Z



Obr. 41. Přírodní radioaktivní rozpadové řady <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th a rozpad <sup>40</sup>K. Označení poločasů rozpadů T: r — roky, d — dny, h — hodiny, min — minuty, s — sekundy

Při krátkém poločasu rozpadu mateřského prvku vzniká *přechodná radioaktivní rovnováha*. Členy rozpadových řad jsou zdroje záření alfa, beta, gama.

K *přírodním radionuklidům*, jejichž první produkty rozpadu jsou stabilní, náležejí  $^{40}\text{K}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  aj. Vzhledem k přítomnosti v horninách je nejdůležitější  $^{40}\text{K}$ , který je ve směsi izotopů K zastoupen 0,012 %, emituje záření beta a gama (obr. 41).

*Umělé radionuklidy* vznikají při vyvolaných jaderných reakcích. Ozáření látek neutrony, nabitými částicemi nebo zářením gama nastávají přeměny jader atomů (6.2) a vznik radioizotopů  $Y^*$ . V jaderné geofyzice se některé používají jako zdroje záření ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  aj.).

### 6.1.3 Jaderné záření

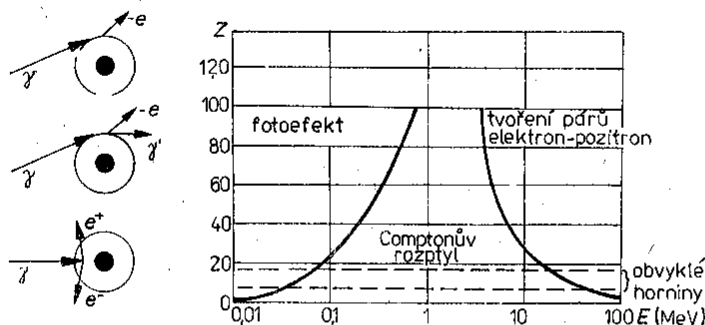
Jednotlivé druhy jaderného záření se liší typem částic, chováním v elektrickém a magnetickém poli a způsoby interakce s hmotou.

*Záření alfa* je proud kladně nabitých částic složených ze 2 protonů a 2 neutronů. Průchodnost částic alfa hmotou je malá, dobř závisí na počáteční energii a na prostředí. Dobř částic alfa přírodních radionuklidů je ve vzduchu do 10 cm, v tuhých látkách 0,01 mm. Jednotlivé radionuklidy emitují částice alfa o charakteristické energii. Částice alfa mají vysoké ionizační účinky.

*Záření beta* je proud záporně nabitých elektronů. Dobř částic beta o energii  $E_0 = 1 \text{ MeV}$  je ve vzduchu 3,9 m, ve vodě 4,38 mm, v Al 2,06 mm, v horninách do 10 mm. Spektrum energií částic beta je spojitě, pohlcení v hmotě popisuje exponenciální závislost.

*Záření gama* přírodních radioaktivních prvků v horninách s energiemi do 2,615 MeV má dobř ve vzduchu 700 m, v horninách 0,5 m, v Pb několik cm. Energie kvant gama je diskrétní a pro každý radionuklid charakteristická.

Při průchodu záření gama hmotou nastává interakce kvant gama s atomy hmoty; nejdůležitější jevy vzájemného působení jsou *fotoefekt*, *Comptonův jev* a tvoření *párů elektron—pozitron*. Účinné průřezy uvedených reakcí jsou závislé na energii  $E$  záření gama a na složení hmotného prostředí, které lze charakterizovat *efektivní hodnotou atomového čísla* (obr. 42). Následkem interakcí je snižování



Obr. 42. Schéma fotoefektu, Comptonova rozptylu, tvoření párů elektron—pozitron a dominantní oblasti jejich interakce s hmotou

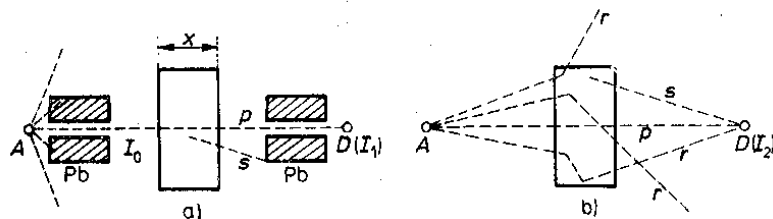
energie kvant gama, jejich rozptyl a pohlcení. Pokles intenzity záření gama při průchodu hmotnou překážkou charakterizuje lineární *koefficient zeslabení záření gama*  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ). Pohlcení primárního záření zdroje o energii  $E_0$  (geometrie úzkého svazku paprsků, obr. 43a) vyjadřuje vztah

$$I_1 = I_0 \exp(-\mu x), \quad (6.9)$$

kde  $I_0$  a  $I_1$  jsou intenzity záření gama před a za hmotnou překážkou o rozměru  $x$  (cm). Při měření celkového záření gama všech energií  $E$  (geometrie širokého svazku paprsků, obr. 43b), zahrnujícího primární záření a záření rozptýlené a sekundární, vznikající v hmotné překážce, lze absorpci popsat vztahem

$$I_2 = I_0 \exp(-\mu x) B, \quad (6.10)$$

kde  $B = I_2/I_1 > 1$  je faktor vzrůstu měřeného pole.



Obr. 43. Pohlcení záření gama v hmotné překážce

a) úzký svazek paprsků, b) široký svazek paprsků, A — zdroj záření, D — detektor, p — primární, r — rozptýlené, s — sekundární kvanta gama, Pb — olověné stínění

Neutrony vznikají při štěpení jader atomů a při jaderných reakcích. Mimo jádro atomu jsou nestabilní a rozpadají se s  $T = 11,7$  min. Podle své energie se označují jako *rychlé* ( $E > 0,5$  MeV), *nadtepelné* a *tepelné* ( $E < 0,5$  eV). Při průchodu neutronů hmotou nastávají interakce *pružný rozptyl*, *nepružný rozptyl* a *záchyt neutronů*. Rychlé a nadtepelné neutrony jsou zpomalovány do energie tepelných neutronů na dráze, kterou pro dané prostředí charakterizuje *délka zpomalení*  $L_s$ , tepelné neutrony se šíří difúzí, dráhu charakterizuje *délka difúze*  $L$ . Celkový doběh neutronů v horninách nabývá hodnot až prvních desítek cm. Neutronové vlastnosti hornin charakterizují dále *koeficient difúze*  $D$  ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) a *střední doba života neutronů*  $\tau$  (s), prakticky  $10^{-4}$  až  $10^{-5}$  s.

*Kosmické záření* je proud nabitých částic ( $\alpha$ ,  $p$ ), které interakcemi se zemskou atmosférou generují sekundární částice a kvanta energie.

Jako *zdroje jaderného záření alfa, beta a gama* se používají přirozené a umělé radionuklidy, u kterých posuzujeme jejich aktivitu  $A$  (Bq), poločas rozpadu ( $s$ ), energii emitovaného záření (eV) a relativní intenzitu (výtěžek) záření na jednotku hmoty zdroje nebo na jeden rozpad. Jako zdroje neutronů se užívají izotopické zdroje emitující neutrony na základě reakce ( $\alpha$ , n) nebo při samovolném štěpení, neutronové generátory využívající reakce  ${}^3\text{H}$  ( $\alpha$ , n)  ${}^4\text{He}$ , které v malorozměrném provedení se označují jako neutronové trubice, a atomové reaktory.

#### 6.1.4 Jednotky jaderných metod v geologii

*Jednotky radioaktivity* jsou stanoveny mezinárodní soustavou SI. Některé výsledky aplikace jaderných metod v geologii se vyjadřují vnějším jednotkami (tab. 13).

*Jakostní faktor* je pro gama a rentgenové záření roven 1, pro protony a neutrony 10, pro záření alfa 20. *Mezní dávkový ekvivalent* pro ozáření je 1 mSv za týden a 50 mSv za rok.

Tabulka 13. Jednotky jaderných metod v geologii

Veličina	Symbol	Jednotka		Poznámka
		název	značka	
aktivita	$A$	becquerel	Bq	1 Bq $\sim$ 1 přeměna za s
expozice (ozáření)	$X$	coulomb na kg	C kg <sup>-1</sup>	ozáření kvanty gama, při kterém je v 1 kg vzduchu uvolněn počet iontů, pro který součet nábojů jednoho znaménka je 1 C
expoziční příkon	$\dot{X}$	ampér na kg	A kg <sup>-1</sup>	$\dot{X} = X/t$
dávka	$D$	gray	Gy	absorbované záření gama 1 Gy = 1 J kg <sup>-1</sup>
dávkový ekvivalent	$H$	sievert	Sv	ekvivalent absorbovaného libovolného záření vzhledem ke škodlivým účinkům v živé tkáni; $H = DQ$ , $Q$ je jakostní faktor záření; 1 Sv = 1 J kg <sup>-1</sup>
emise zdroje	$\Phi p$	jedna za s	s <sup>-1</sup>	
energie záření	$E$	elektronvolt	eV	1 eV = 1,602 · 10 <sup>-13</sup> J
koncentrace radioaktivních prvků	$Q$	obecně: horniny: tekutiny, plyny:	Bq kg <sup>-1</sup> %, ppm Bq l <sup>-1</sup>	1 ppm = 10 <sup>-6</sup> g g <sup>-1</sup> = 10 <sup>-4</sup> %

Pozn.: Pole gama záření hornin je podle novelizace jednotek možno vyjádřit veličinou *příkon kermy* vo vzduchu,  $K_a$ , jejíž jednotkou je gray za sekundu, Gy s<sup>-1</sup>. Převodní vztah je 1 A kg<sup>-1</sup> = 33,682 17 Gy s<sup>-1</sup>.

## 6.2 Měření jaderného záření

K měření jaderného záření  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , n se užívají *radiometrické přístroje*. Podstatnou částí aparatur jsou *detektory*. Způsob měření jaderného záření je podmíněn jeho charakterem a konstrukcí radiometrických přístrojů.

### 6.2.1 Detektory

V detektorech nastává přeměna energie záření na elektrické veličiny. V geofyzice se užívají detektory různých typů.

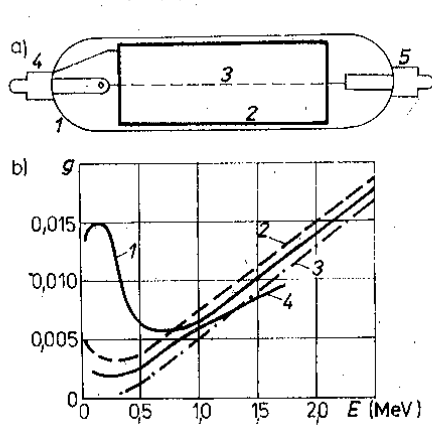
*Ionizační komory* využívají ionizačních vlastností jaderného záření. Ionizační komory jsou obvykle válcového tvaru. Záření zdroje ionizuje v komoře přítomný plyn; podle stupně jeho ionizace protéká mezi elektrodami komory *ionizační proud*, jehož hodnota je mírou radioaktivity zdroje. Ionizační komory se nejčastěji užívají k detekci záření alfa.

*Proporcionální počítače* jsou válcového tvaru, jsou plněny plynem, v ose válcové katody je vodivé vlákno — anoda. Po dopadu ionizující částice do prostoru počítače vzniká řetězová reakce násobení počtu iontů, podmíněná silným elektrickým polem mezi elektrodami. Mezi elektrodami proteče proud, který se na výstupu počítače projeví jako napěťový impuls. Amplituda impulsu je úměrná energii dopadlé částice (proporcionalita). Počítače se užívají k analýze energií jaderného záření (spektrometrie).

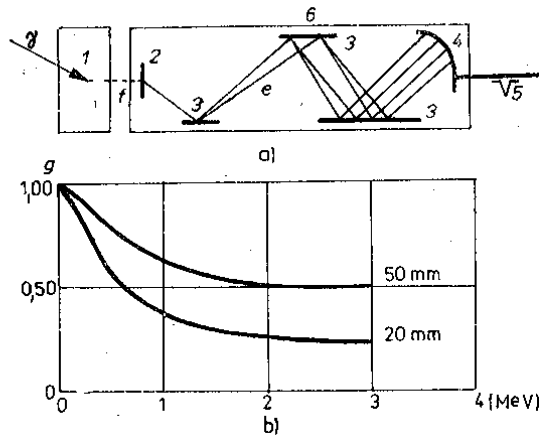
*Geigerovy-Müllerovy počítač trubice* jsou konstrukčně podobné proporcionálním počítačům, pracují však při vyšších napětích (200 až 1 500 V) (obr. 44).

Amplitudy impulsů na výstupu jsou přibližně jednotné a nejsou úměrné energiím detekovaných částic. Částice beta jsou detekovány přímo, kvanta gama uvolňují z katody GM počítače elektrony, které realizují prvotní ionizaci.

Scintilační počítače se skládají ze scintilační látky a fotonásobiče (obr. 45). Dopad částice do scintilační látky podmíní emisi fotonu (scintilace), který z fotokatody fotonásobiče vyráží elektrony, jejichž počet se ve fotonásobiči progresivně znásobí. Elektronový mrak dopadlý na anodu podmíní vznik napětového impulsu na výstupu počítače, jehož amplituda je úměrná energii detekované částice. Scintilační počítače ZnS(Ag) lze užít pro spektrometrii alfa, CsI(Tl) pro spektrometrii beta, NaI(Tl) pro spektrometrii gama.



Obr. 44. Geigerova-Müllerova počítač trubice pro detekci záření gama  
a) 1 — obal, 2 — katoda, 3 — anoda, 4 a 5 spoj anody a katody, b) účinnost GM počítačů pro detekci záření gama. Materiál katody: 1 — W, 2 — Cu, 3 — grafit, 4 — ocel



Obr. 45. Scintilační počítač  
a)  $\gamma$  — kvantum gama,  $f$  — foton,  $e$  — elektron, 1 — scintilační látka, 2 — fotokatoda fotonásobiče, 3 — pomocné elektrody, 4 — anoda, 5 — impuls, 6 — fotonásobič, b) účinnost krystalů NaI(Tl), výška krystalu 50 mm a 20 mm

Polovodičové počítače využívají vzniku volných nositelů nábojů po dopadu detekovaných částic do účinného objemu polovodiče. Amplituda impulsu na výstupu počítače je úměrná energii detekované částice. Užívají se k detekci nabitých částic, rentgenového záření a záření gama. Pro spektrometrii gama se užívá detektorů Si(Li), Ge(Li) a Ge.

Detektory neutronů jsou počítače podobných konstrukcí, ve kterých přidáním vhodné látky se uskuteční reakce, při které je neutrony uvolněná nabitá částice detekovatelná podle ionizačních účinků.

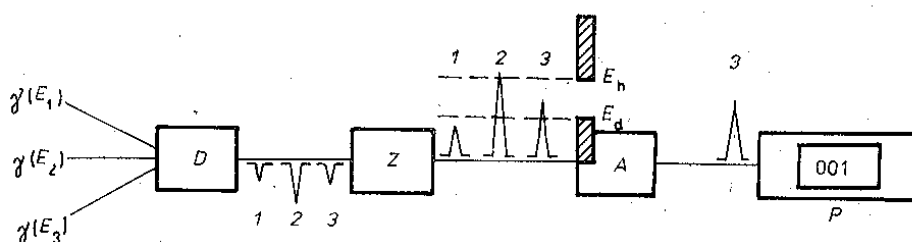
Citlivost detektoru je dána četností produkovaných impulsů ( $\text{imp s}^{-1}$ ) při ozáření jednotkovým polem. Účinnost počítače  $g(E)$  je poměr počtu impulsů na výstupu počítače k počtu částic dopadlých do jeho objemu. Spektrální rozlišovací schopnost  $rs$  detektoru vyjadřuje kvalitu ostrého vymezení energií detekovaných částic.

## 6.2.2 Radiometrické aparatury

Dozimetry sčítají hodnoty ozáření, kterému je přístroj vystaven, intenzimetry měří okamžitou hodnotu pole radioaktivity, kde se přístroj nalézá.

Impulsy vzniklé na výstupu detektoru se zesilují, analyzují a sčítají.

Podle způsobu sčítání impulsů se přístroje dělí na *analogové měřiče střední četnosti impulsů*, u kterých odečítanou veličinou je četnost impulsů  $n$  ( $s^{-1}$ ), a *digitální počítače impulsů*, které signalizují počet impulsů  $N$  naměřených za čas  $t$ ;  $n = N/t$ . Měřiče střední četnosti impulsů sčítají signál na integračním obvodu  $RC$ ; hodnota součinu odporu  $R$  ( $\Omega$ ) a kapacity  $C$  (F) udává časovou konstantu  $RC$  (s) přístroje. Podle způsobu analýzy impulsů se aparatury dělí na *přístroje na měření úhrnné aktivity*, které nerozlišují energie záření, a na *spektrometry* (analyzátoři) využívající úměrnost amplitudy impulsů a energie detekovaného záření. Spektrometry se dělí na *integrální* (prahové) a *diferenciální*, které registrují částice příslušející do vymezeného pásma (kanálu, okna) energií (obr. 46). Diferenciální spektrometry jsou jednokanálové nebo mnohokanálové, které analyzují celé spektrum energií současně.



Obr. 46. Schéma funkce jednokanálového diferenciálního spektrometru  
*D* — detektor, *Z* — zesilovač impulsů, *A* — analyzátor impulsů, *P* — počítač impulsů,  
*E<sub>d</sub>* — dolní úroveň diskriminace, *E<sub>h</sub>* — horní úroveň diskriminace, 1, 2, 3 — impulsy

### 6.2.3 Nahodilost jaderných přeměn

Přeměny jader atomů, a tím i emise jaderného záření mají *pravděpodobnostní charakter*, který vyjadřuje Poissonův vztah

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} \exp(-\bar{n}), \quad (6.11)$$

kde  $\bar{n}$  je střední četnost rozpadů a  $P(n)$  pravděpodobnost, že v jednotce času se rozpadne  $n$  jader atomů. Pro Poissonovo rozdělení platí, že *rozptyl*  $s = \bar{n}$  a *směrodatná (standardní) odchylka*

$$\sigma = \sqrt{\bar{n}}. \quad (6.12)$$

Odchylky od střední hodnoty počtu rozpadů v jednotce času nebo měřené radioaktivity se nazývají *fluktuace*. Odchylka  $\sigma$  omezuje pásmo zahrnující 68,3 % všech fluktuací,  $2\sigma$  odpovídá 95,5 % a  $3\sigma$  99,7 % všech fluktuací.

### 6.2.4 Chyby měření jaderného záření

*Nahodilé chyby* jsou podmíněny statistickým charakterem jaderných přeměn. Při měření radioaktivity počítačem impulsů je naměřeno  $N$  impulsů za čas  $t$ . *Standardní odchylka* je

$$\sigma(N) = \sqrt{N} \quad (6.13)$$

a *relativní hodnota standardní odchylky* měřeného signálu  $N$

$$\delta(N) = \frac{\sigma(N)}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (6.14)$$



Četnost impulsů určíme ze vztahu  $n = N/t$ . Při měření radioaktivity geologického objektu  $A$  se současně měří hodnota pozadí  $P$ . Relativní hodnota standardní odchylky stanovené četnosti impulsů  $n_A$  objektu  $A$  je

$$\delta(n_A) = \left( \frac{1 + 2n_P/n_A}{n_{At}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.15)$$

odkud vyplývá, že přesnost měření jaderného záření studovaného objektu lze zvýšit použitím citlivějšího detektoru, stíněním pozadí a zvětšením doby měření.

Při měření radioaktivity měřičem střední četnosti impulsů je relativní hodnota standardní odchylky

$$\delta(n) = (2nRC)^{-\frac{1}{2}}. \quad (6.16)$$

Chybu měření lze snížit zvětšením konstanty ( $RC$ ) přístroje a použitím citlivějšího detektoru.

*Mrtvá doba aparatury* odpovídá času potřebnému k detekci a registraci jedné dopadlé částice. V této době přístroj nereaguje na dopad dalších částic. Při měření vysokých aktivit se výsledky měření opravují na mrtvou dobu přístroje.

*Citlivost radiometrické aparatury* je velikost změny jejího výstupu podmíněná jednotkovou změnou měřeného pole. Mez citlivosti je nejmenší věrohodně stanovitelná změna radioaktivity na pozadí fluktuací. Mez stanovitelnosti je dána limitní spodní určitelnou koncentrací sledovaného prvku.

### 6.3 Radiometrické metody průzkumu

Měření přirozené radioaktivity hornin umožňuje jejich rozlišení. Přítomnost přirozených radioaktivních prvků v horninách se v terénních podmínkách nejčastěji stanovuje *metodami gama a emanometrie*.

#### 6.3.1 Radioaktivita zemské kůry

*Přirozená radioaktivita hornin* je v podstatě určována přítomností K, U a Th (tab. 14). Radioaktivita magmatických hornin má tendenci růst s kyselostí hornin. Radioaktivita sedimentárních hornin závisí na povaze usazovaného materiálu; epigenetické pochody mohou radioaktivitu sedimentů měnit. Radioaktivita metamorfovaných hornin odpovídá převážně vlastnostem výchozího materiálu. Injekční metamorfóza s živcovým metatektem radioaktivitu hornin zvyšuje, křemenný metatekt je neaktivní.

Tabulka 14. K, U, Th v horninách

Horniny	% K	ppm U	ppm Th	Th/U
kyselé magmatity	3,3	3,5	18,0	5,1
střední magmatity	2,3	1,8	7,0	4,0
bazické magmatity	0,8	0,5	3,0	6,0
břidlice, jíly	3,2	4,0	11,0	2,8
pískovce	1,2	3,0	10,0	3,3
vápence	0,3	1,4	1,8	1,3

Na úhrnné aktivitě gama se K, U, Th podílejí přibližně stejnými díly.

### 6.3.2 Základy metod gama

Intenzita  $I$  záření gama ve vzdálenosti  $r$  od bodového zdroje s hmotností radioaktivní látky  $m$  v hmotném prostředí s lineárním součinitelem zeslabení záření gama  $\mu_2$  je dána vztahem

$$I = \frac{km}{r^2} \exp(-\mu_2 r), \quad (6.17)$$

kde  $k$  je konstanta závislejší na kvalitě zdroje. Pro trojrozměrná tělesa s koncentrací radioaktivního prvku  $Q$ , hustotou  $\rho$  a pohlcením záření  $\mu_1$  ve vlastním tělese platí

$$I = \frac{\omega k Q \rho}{\mu_1}, \quad (6.18)$$

kde  $\omega$  je prostorový úhel vyjadřující geometrické podmínky měření. Pro nekonečný poloprostor  $\omega = 2\pi$  sr (měření na povrchu země), pro nekonečný prostor  $\omega = 4\pi$  sr (měření ve vrtech).

Spektra energií primárního záření gama K, U, Th jsou složena z jednotlivých linií, které charakterizuje hodnota energie  $E$  (eV) a intenzita linie  $I(E)$  vyjádřená počtem uvolněných kvant gama na 1 rozpad (obr. 47). Průchodem primárního záření gama hmotou vzniká rozptýlené a sekundární záření. Všechny složky společně vytvářejí spojité spektrum energie. V závislosti na detektoru a podmínkách měření se v naměřeném spektru projevují energie primárního záření, podle kterých lze prvky stanovovat kvalitativně a kvantitativně (obr. 48).

Měření úhrnné aktivity gama je založeno na registraci všech kvant gama o energii vyšší, než je diskriminační úroveň přístroje. Měřená četnost impulsů  $n_T$  ( $s^{-1}$ ) je relativní mírou přítomnosti K, U, Th v horninách. Cejchování přístrojů bodovým standardem Ra umožňuje převod údajů  $n_T$  na jednotky expozičního příkonu záření gama ( $A \text{ kg}^{-1}$ ). Vhodnější je cejchování nad velkými trojrozměrnými standardy o známé koncentraci  $U$  a převod na jednotky ppm eU nebo Ur ( $1 \text{ Ur} \sim \sim 1 \text{ ppm eU}$ ). Teoreticky  $1 \text{ Ur} \sim 0,043 \text{ pA kg}^{-1}$ .

Gama spektrometrická měření umožňují stanovení radionuklidů v horninách. Za použití scintilačních počítačů NaI(Tl) se pro stanovení K, U, Th nejčastěji užívají energie 1,46 MeV ( $^{40}\text{K}$ ), 1,76 MeV ( $^{214}\text{Bi}$ , člen rozpadové řady  $^{238}\text{U}$ ) a 2,62 ( $^{208}\text{Tl}$ , člen rozpadové řady  $^{232}\text{Th}$ ). Vztahy mezi měřenými četnostmi impulsů  $n_1, n_2, n_3$  ve třech zvolených oknech energie jsou úměrné koncentracím  $Q_K, Q_U, Q_{Th}$ :

$$\begin{aligned} n_1 &= a_1 Q_K + b_1 Q_U + c_1 Q_{Th}, \\ n_2 &= \quad \quad b_2 Q_U + c_2 Q_{Th}, \\ n_3 &= \quad \quad b_3 Q_U + c_3 Q_{Th}. \end{aligned} \quad (6.19)$$

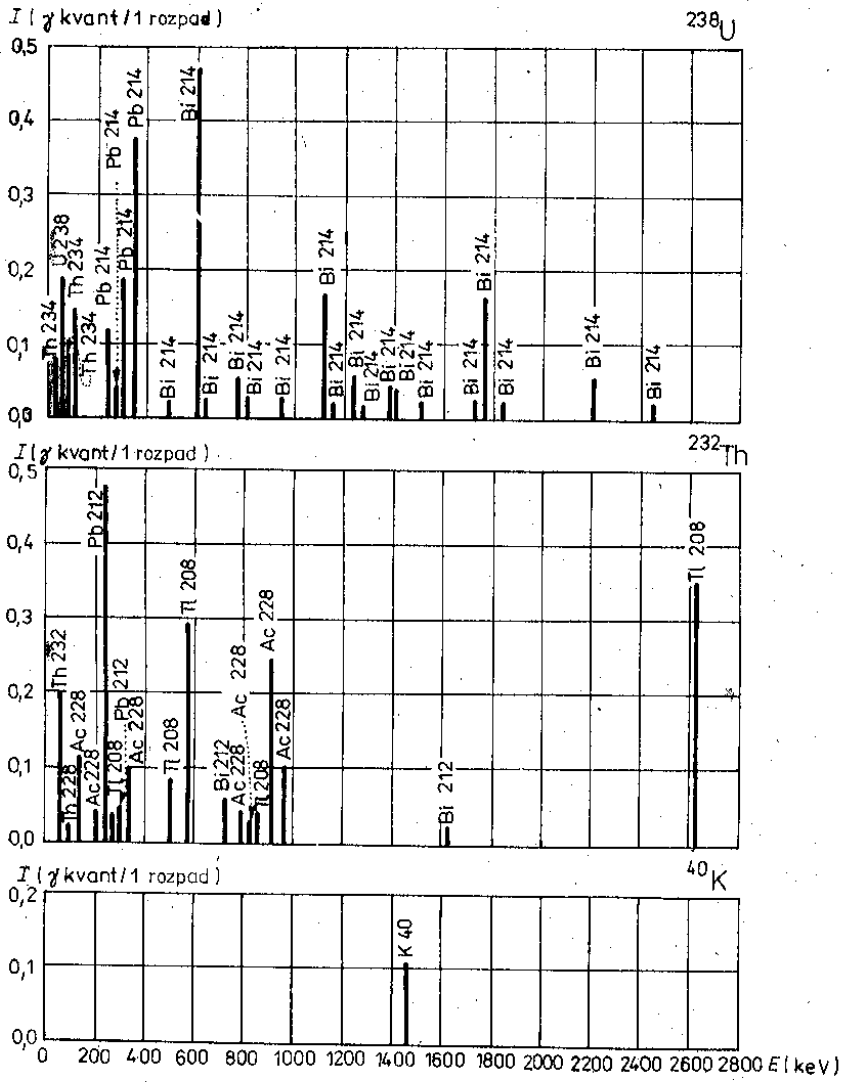
Konstanty  $a_1, \dots, c_3$  se určí cejchováním nad trojrozměrnými standardy o známé, koncentraci K, U, Th. Řešením rovnic (6.19) lze určit  $Q_K$  (% K),  $Q_U$  (ppm eU, určení U nepřímé) a  $Q_{Th}$  (ppm eTh, určení Th nepřímé).

Měřené pole aktivity gama při studiu radioaktivity hornin je součtem vlastního pozadí přístroje  $I_{VP}$ , kosmického záření  $I_{KZ}$ , radioaktivity hornin  $I_{RH}$ , účinku radioaktivního spadu  $I_{RS}$  a vzdušného radonu  $I_{Rn}$ :

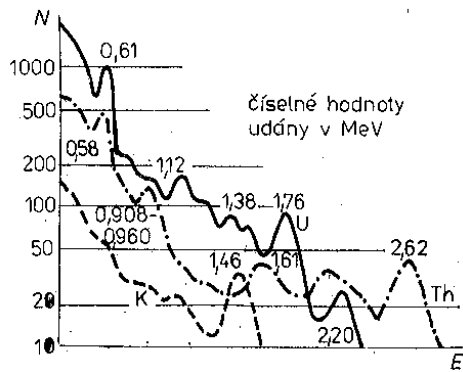
$$I = I_{VP} + I_{KZ} + I_{RH} + I_{RS} + I_{Rn}. \quad (6.20)$$

$I_{VP} + I_{KZ} = I_P$  je pozadí, jehož hodnota se stanoví měřením nad vodní plochou. Významné odchylky od normálního pole radioaktivity hornin nazýváme anomálie radioaktivity  $I_a$ ;  $I_a$  musí splňovat podmínku

$$I_a \geq 3 \sqrt{\sigma_{RH}^2 + \sigma^2}, \quad (6.21)$$



Obr. 47. Spektra energií záření gama rozpadových řad  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  a draslíku  $^{40}\text{K}$



Obr. 48. Přístrojové spektrum energií záření gama K, U, Th naměřené detektorem NaI(Tl). Číselné hodnoty uvedeny v MeV

kde  $\sigma_{RH}$  je směrodatná odchylka proměnnosti radioaktivity geologické struktury a  $\sigma$  standardní odchylka měření radioaktivity daným přístrojem.

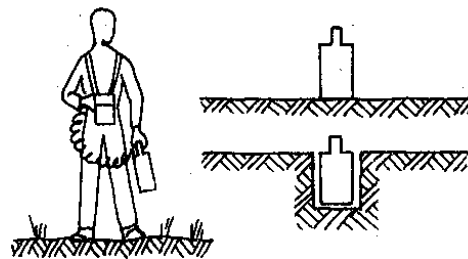
*Hloubkový dosah metod gama v horninách je 0,5 m. Lokalizace hlouběji uložených radioaktivních těles je umožněna existencí mechanických, solných a plyných aureol.*

### 6.3.3 Terénní průzkum metodami gama

*Letecká měření radioaktivity hornin se realizují z výšek do 150 m za použití citlivých aparatur umístěných v letadlech nebo vrtulnících při rychlostech letů do 200 km h<sup>-1</sup> (obr. 49). Anomální zdroje o malých plochách jsou obtížněji lokalizovatelné než velké plochy s nízkou koncentrací radioaktivních prvků. Naměřené hodnoty mohou být ovlivřeny geometrií reliéfu, účinkem vzdušného radonu a stíněním záření lesy.*



Obr. 49. Vrtulník Mi-2 s leteckým magnetometrem a spektrometrem gama. Detektory spektrometru gama o objemu 14 829 cm<sup>3</sup> NaI(Tl) umístěny vně vrtulníku (Geofyzika, n. p., Brno)



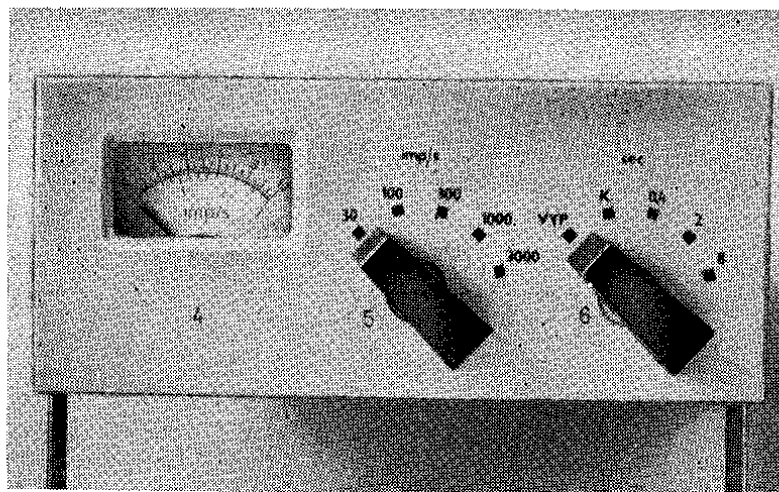
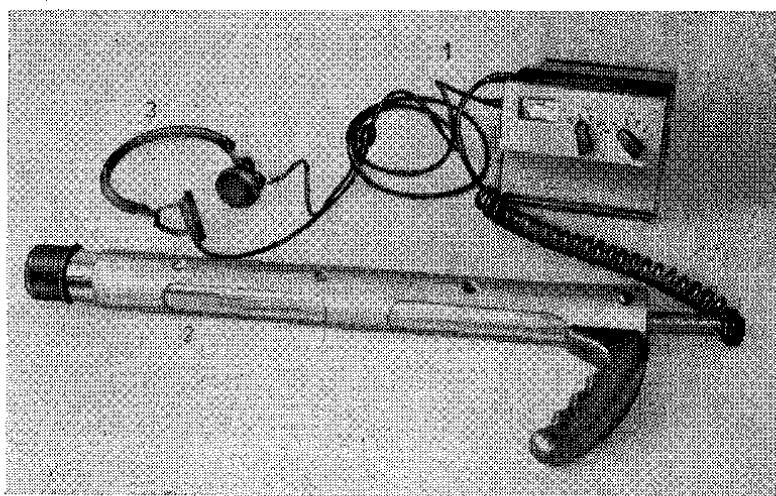
Obr. 50. Geometrie terénních měření s přenosnými radiometry

Průzkum bývá veden v pravidelné síti rovnoběžných profilů nebo v horských oblastech způsobem vrstevnicového létání. Vzdálenosti profilů se volí v závislosti na účelu průzkumu 250 až 5 000 m; navigace se provádí vizuálně nebo pomocí elektronických zařízení. K dokumentaci dráhy letu slouží fotokamery nebo videozáznamy. Radioaktivita hornin se zaznamenává analogově nebo digitálně v jednosekundových intervalech společně s výškou letu  $h$  a popřípadě pozicí letadla  $x, y$ . Při zpracování dat se zavádějí opravy na pozadí, výpočet jednotlivých účinků zdrojů K, U, Th, oprava na jednotnou výšku letu a oprava na vzdušný Rn. Letecká spektrometrie umožňuje stanovit rozdíly radioaktivity hornin 0,3 % K, 1 ppm eU a 2 ppm eTh. Denní výkon jedné letecké skupiny je 300 až 800 km profilů.

*Automobilový gama průzkum se užívá k výzkumu samostatných území a k detailizaci letecky zjištěných anomálií. Gama spektrometrické aparatury*

s detektory NaI(Tl) o objemu větším než 2 000 cm<sup>3</sup> zaznamenávají radioaktivitu hornin v pásnu 20 až 40 m širokém v závislosti na výšce umístění detektoru. Na registrované hodnoty mají vliv nerovnosti terénu blízké k trase měření, jako jsou úbočí, svahy a zářezy. Měření je nutno realizovat po přírodních neupravených cestách, navigace a záznam měřených tras se provádí pomocí topografických map. Výsledky automobilového průzkumu se prezentují mapami profilů nebo mapami izolinií úhrnné gama aktivity hornin a koncentrací K, U, Th s citlivostí obdobnou leteckým měřením. Pracovní skupina změří denně 60 až 300 km profilů.

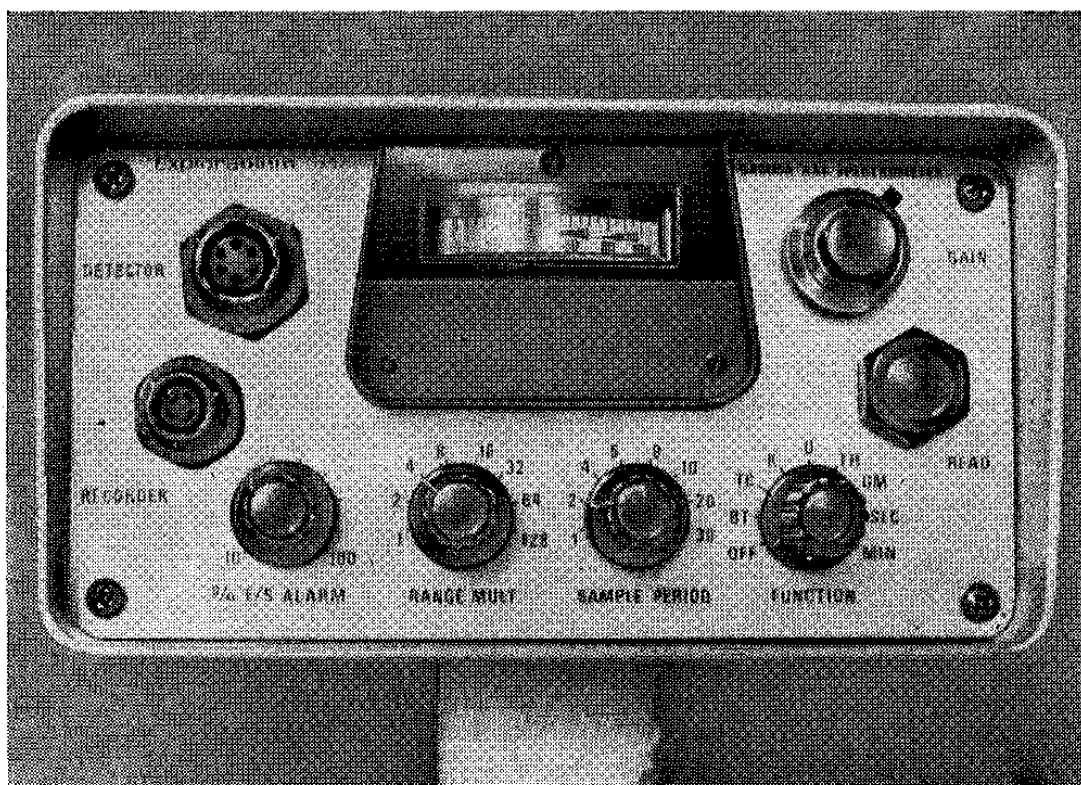
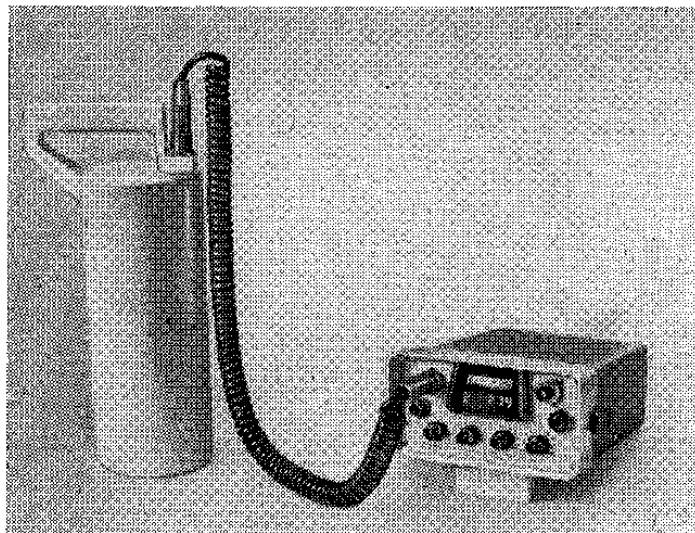
*Měření gama aktivity hornin přenosnými radiometry umožňuje plošné a detailní výzkumy. Sonda radiometru se umísťuje do malých výšek nad povrch, na povrch nebo do připravených jamek. Citlivost metody roste s prostorovým úhlem detekce záření gama (obr. 50), šířkový dosah s výškou detektoru. Měření*



*Obr. 51. Polní přenosný radiometr RP-11 (ČSÚP) (foto R. Duda)  
1 — blok radiometru, 2 — sonda se scintilačním detektorem, 3 — sluchátka, 4 — měřidlo střední četnosti impulsů, 5 — přepínač rozsahů, 6 — vypínač, kontrola baterií, přepínač časové konstanty*

na všech bodech musí být realizována v jednotných geometrických podmínkách, kterým odpovídá způsob cejchování přístrojů.

K měření úhrnné aktivity gama hornin se užívají lehké měřiče střední četnosti impulsů, nejčastěji se *scintilačními detektory*  $NaI(Tl)$   $30 \times 20$  mm a možností volby časové konstanty  $RC$  přístroje (obr. 51). Naměřené hodnoty se odečítají



Obr. 52. Gama spektrometr GR 410 s automatickou stabilizací zesílení impulsů (Geometries/Exploranium) (foto R. Duda)

po čase  $t = 4RC$  (s) na bodě záměry, mezi body se radioaktivita hornin sleduje podle frekvence detekovaných gama kvant akusticky. Výsledky se zobrazují jako mapy profilů nebo mapy izolinií v jednotkách  $Ur$  nebo  $pA \cdot kg^{-1}$ .

*Přenosné spektrometry gama* jsou čtyřrokové analyzátoři, převážně digitální, umožňující stanovit hodnoty úhrnné gama aktivity hornin a záření gama draslíku, uranu a thoria (obr. 52). Jako detektorů se užívá krystalů  $NaI(Tl)$   $50 \times 50$  až  $80 \times 80$  mm. Pro měření na povrchu země je nutné dodržet rovinnost plochy v kruhu o průměru 1 až 2 m. Doba měření na jednom bodě závisí na aktivitě hornin, velikosti objemu detektoru a požadované přesnosti výsledků; obvykle se volí 2 až 4 minuty. Od naměřených hodnot se odečítá hodnota pozadí a koncentrace K, U, Th se určí výpočtem podle rovnic (6.19). Metodou lze rozlišovat 0,2 % K, 1 ppm eU a 2 ppm eTh. Hmotnost měřeného vzorku je v závislosti na detekované energii až 350 kg.

Měřením na výchozech stanovíme základní údaje o radioaktivitě hornin oblasti; měřítka 1 : 25 000 až 1 : 5 000 odpovídají vyhledávacímu průzkumu a mapování, detailizace anomálií se provádí v měřítku 1 : 500; vzdálenost záměr na profilu je 1 až 50 m.

Šířkový dosah povrchových měření je obvykle vztahován na průměr  $2r$  kruhové plochy, která pro danou výšku detektoru produkuje 90 % detekovaného záření gama hornin. Šířkový dosah závisí na energii detekovaného záření (tab. 15).

Tabulka 15. Šířkový dosah metod průzkumu gama

Měření	Výška detektoru (m)	$2r$ (m)
letecká	50	330
	100	470
automobilová	1	20
	1,5	35
pěší	0,02	0,4
	0,15	3,0

*Hloubkový průzkum gama* za použití penetračně vrtních zařízení umožňuje zjišťování radioaktivity hornin podloží v oblastech s mocností pokryvných útvarů 10 až 15 m. Vrty o průměru 45 až 90 mm se hloubí mobilními agregáty, gama aktivity hornin se proměřuje lehkými přenosnými aparaturami. Výsledky měření se zobrazují jako mapy profilů aktivity na čelbách vrtů nebo jako profily aktivity gama podél jednotlivých vrtů.

#### 6.3.4 Radiometrické vzorkování

Radiometrické vzorkování umožňuje stanovení koncentrace radioaktivních prvků v lokálních objektech a určení mocností zrudnělých poloh. Vzhledem k směrové účinnosti měření lze aktivitu zkoumaných objektů stanovit i ve vysokém poli okolního záření.

Radiometrické vzorkování s absorpčními filtry je založeno na úměrnosti koncentrace radioaktivních prvků zkoumaného rudního tělesa k rozdílu měření s odkrytým detektorem a detektorem stíněným absorpčním filtrem. Při vzorkování s radiometry směrového příjmu se kompenzuje signál gama aktivity okolních hornin, měřená aktivity gama odpovídá pouze účinkům lokálního zrudnění. Mocnost zrudněných poloh se určuje profilovým měřením s malým krokem postupu.

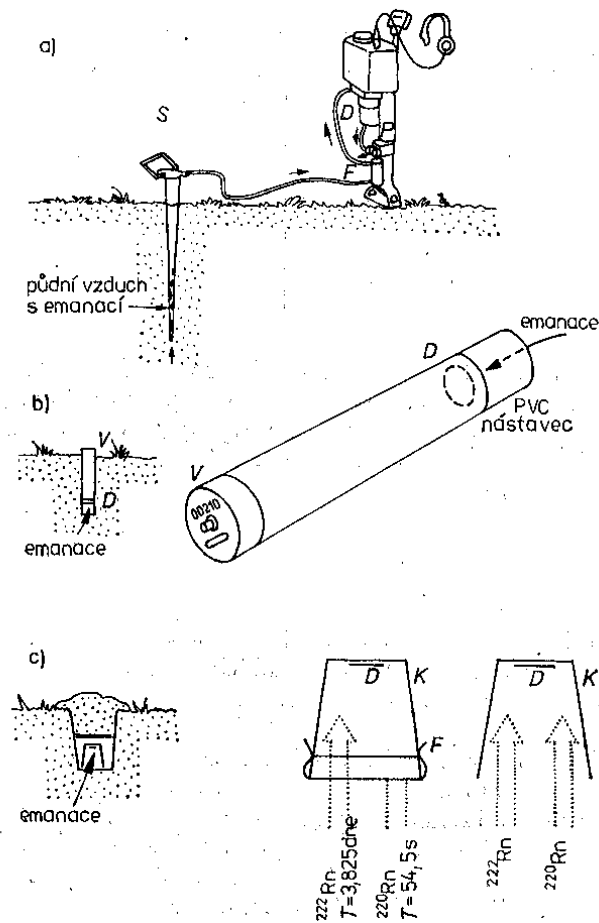
### 6.3.5 Emanometrie

Rozpadem radionuklidů přirozených rozpadových řad vznikají v horninách radioaktivní plyny — emanace (tab. 16). Měřením pole emanace v půdním vzduchu nebo ve vodách lze zjišťovat přítomnost těles U.

Tabulka 16. Emanace

Rozpadová řada	Emanace	$T$	Název emanace
$^{238}\text{U}$	$^{222}\text{Rn}$	3,825 d	radon
$^{235}\text{U}$	$^{219}\text{Rn}$	3,92 s	aktinon
$^{232}\text{Th}$	$^{220}\text{Rn}$	54,5 s	thoron

Emanace se v horninách šíří difúzí; zdánlivý koeficient difúze  $D$  je závislý na kompaktnosti hornin. Koncentrace radonu klesne v horninách na hodnotu jedné setiny koncentrace  $U$  zdroje ve vzdálenosti 2 až 6 m. Pole koncentrace emanace v horninách závisí na přítomnosti  $U$  a  $\text{Th}$  a na koeficientu emanování hornin; nabývá hodnot do  $200 \text{ Bq l}^{-1}$ . Anomálie podmíněné  $U$  tělesy dosahují



Obr. 53. Schéma měření koncentrace emanace a) přenosným emanometrem (S — sonda, F — filtr, D — detekční komora, P — pumpa); b) alfametrem (D — polovodičový detektor záření alfa, V — digitální výstup naměřeného signálu a času měření); c) metodou alfa stop (K — kalíšek, F — filtr, D — detekční fólie)



hodnot řádu  $10^3 \text{ Bq l}^{-1}$ . Emanace se snáze šíří po poruchách a v příznivých případech umožňují jejich lokalizaci. Emanace se rozpadají výhradně přeměnou alfa.

Přítomnost emanací se zjišťuje různými metodami (obr. 53). Tradiční metodou je měření emanace přenosnými *emanometry*. Půdní vzduch z díry 1 až 2 m hluboké se nasaje do detekční komory emanometru a změří se jeho aktivita alfa. Po ocejchování emanometru lze výsledky vyjádřit v jednotkách  $\text{Bq l}^{-1}$ ; opravu na thoron lze zavést z druhého měření s odstupem času 2 minut. Hlubinný dosah metody při vyhledávání U je jednotky až desítky metrů.

*Metoda stop alfa částic* je založena na účincích záření alfa na citlivé fotopapíry. Kalfásky s citlivým fotopapírem pro detekci částic alfa se umístí v jamkách na dobu 3 až 4 týdnů. Po vyvolání filmu udává hustota stop částic alfa (stop  $\alpha$  na  $1 \text{ mm}^2$  při expozici 30 dní) pole koncentrace emanace. Měření se realizuje ve stacionárních podmínkách; hloubkový dosah metody pro lokalizaci U těles se uvádí až 100 m.

*Přenosné digitální měřiče aktivity alfa emanací* (alfametry) se umísťují do mělkých vyhloubených jamek na dobu expozice hodiny až dny. Počet zaregistrovaných částic s spolu dobou měření určují pole koncentrace emanace.

*Metoda alfa card* je založena na měření aktivity alfa produktů rozpadu emanace zachycených na kolektoru umístěném na dobu 12 hodin v jamce. Z měření opakovaných po 5 hodinách lze zavést opravu na účinek thoronu.

*Systém ROAC* je založen na adsorpci radonu na aktivním uhlí a na stanovení gama aktivity jeho produktů rozpadu. Indikátory s aktivním uhlím se umísťují do bodů měřičské sítě v terénu. Doba expozice je 5 až 8 dní.

Stanovení pole koncentrace emanace přenosnými *emanometry* je v terénu rychlé a operativní. Výsledky bývají ovlivněny způsobem čerpání půdního vzduchu a změnami pole koncentrace emanace podmíněnými tlakem a cirkulací vzduchu. Určení pole emanace měřením ve stacionárních podmínkách vyžaduje relativně dlouhé expozice a mívá obvykle nižší citlivost, avšak eliminuje časové změny měřeného pole.

### 6.3.6 Použití radiometrických metod

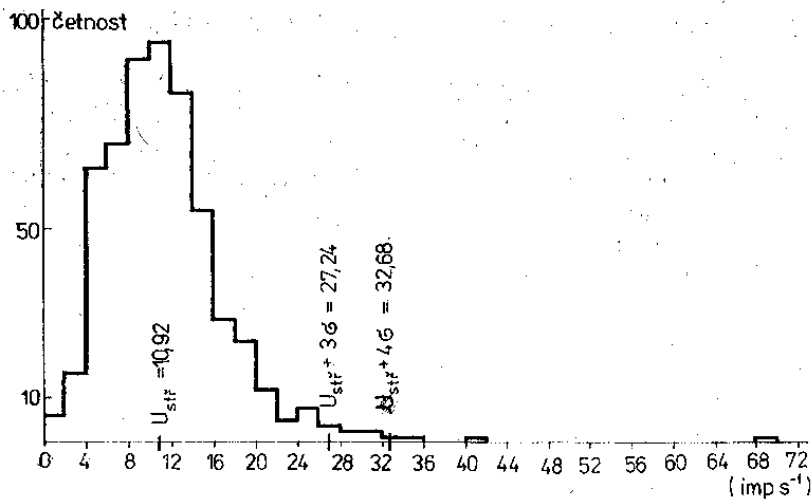
Přítomnost přirozených radioaktivních prvků v horninách se určuje při řešení různých geologických úkolů.

*Průzkum radioaktivních surovin* je založen na vyhledávání anomálně radioaktivních objektů, zjištění jejich kvality a na kvantitativním určení radioaktivních těles. Disperzní aureoly existující kolem U zrudnění s koncentracemi o 8 až 20 ppm U většími než okolní horniny a s rozměry desítek a stovek metrů jsou obvykle objektem, který bývá ve fázi vyhledávání lokalizován. Perspektivní U anomálie se vyznačují parametry: koncentrace U desítky ppm; U roste s hloubkou;  $\text{Th/U} < 1$ ;  $\text{U/K} > 5$  až 10; gama aktivita U je více než jedna polovina signálu úhrnné gama aktivity; v zóně mineralizace a zóně výnosu lze pozorovat redistribuci K, U, Th; anomálie gama provází anomálie emanometrická. Vodítkem pro vymezení anomálií je statistické zpracování údajů o radioaktivitě jednotlivých horninových typů (obr. 54).

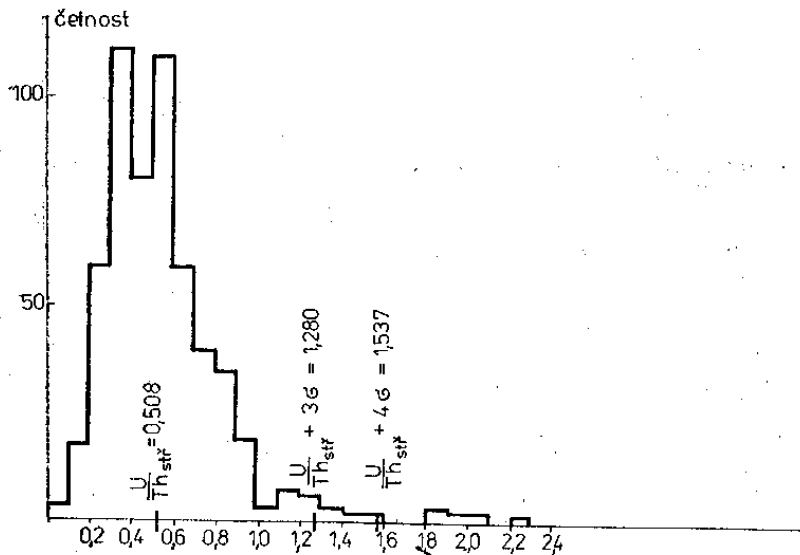
*Regionální gama spektrometrický průzkum* umožňuje geochemické mapování. Jednotlivé litologické celky lze vymezit podle koncentrací K, U, Th, jejich poměrů a typu proměnnosti pole radioaktivity.

Radiometrické metody se význačně uplatňují při *těžbě uranu*. Podle důlních měření se řídí postup a způsob dobývání. Radiometrické kontrolní stanice měří množství těžené a transportované rudy a systém radiometrického rozdělování automaticky obohacuje U rudu a odděluje hlušinu na úpravárnách.

*Endogenní ložiska a některá exogenní ložiska neradioaktivních prvků vznikají za geochemických podmínek, které podmiňují změny koncentrace radioaktivních prvků K, U, Th v rudních zónách a okolních horninách. Studium a stanovení regresních vztahů mezi K, U, Th a neradioaktivními prvky umožňuje jejich nepřímé vyhledávání. Význačným ukazatelem přeměn a výskytu endogenních rudních ložisek je obsah K. V zónách albitizace a prokřemenění obsah K klesá, v zónách feldspatizace a sericitizace obsah K roste. Th je v granitoidech obvykle vázáno s výskyty Sn, W, Mo, Ta, Nb, Zr. U projevuje někdy přímo úměrnou závislost k hydrotermálním polymetalickým ložiskům Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Bi, Ag aj. Význačně se uplatňuje vztah U k exogenním ložiskům Cu, V, P a k Au konglomerátům (obr. 55).*

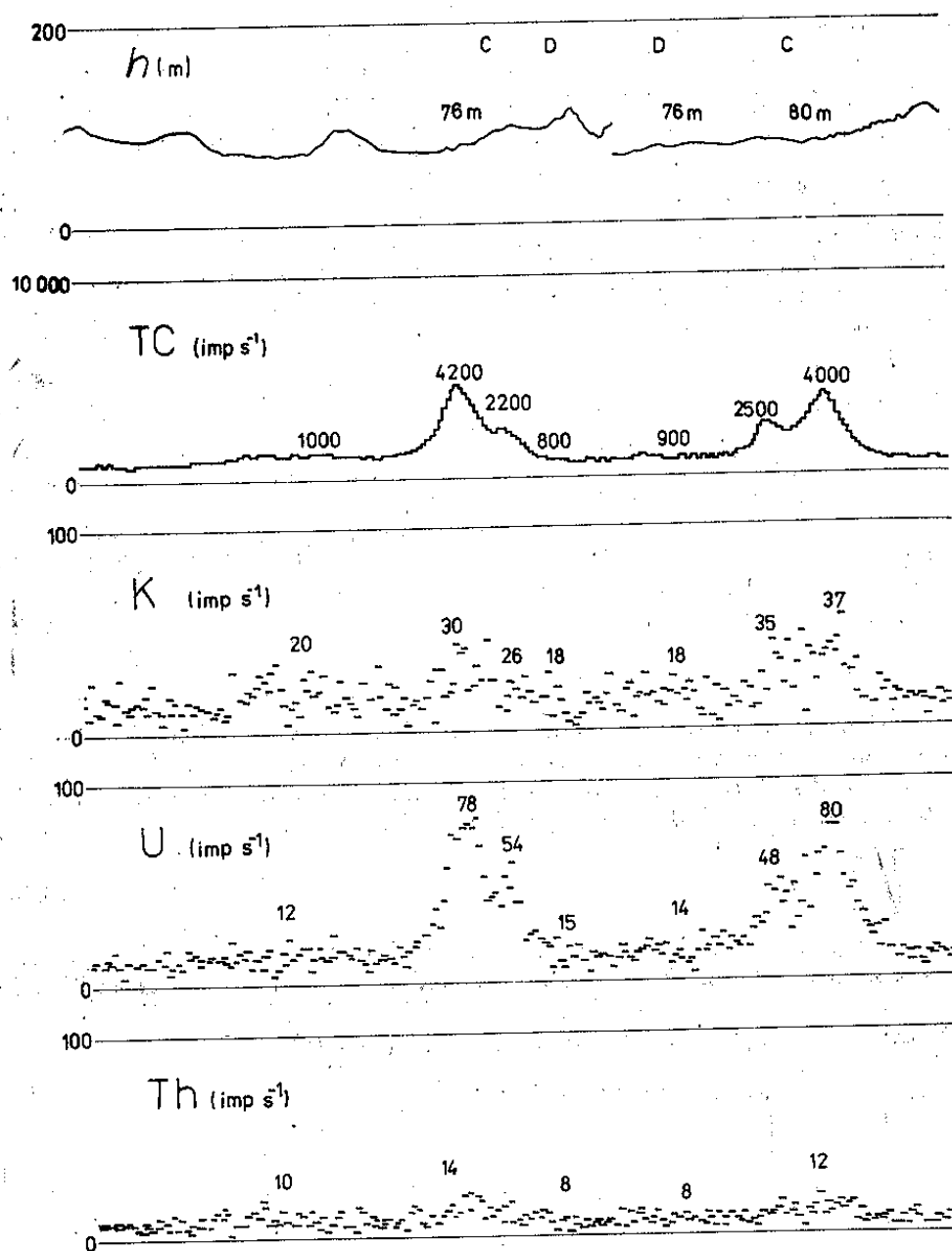


a)



b)

**Obr. 54.** Histogramy gama aktivity U a poměru U/Th podle výsledků letecké spektrometrie gama v oblasti syenitů a episyenitů BouAzzer—El Graara, Maroko. V místech abnormálních hodnot (+3σ) a anomálních hodnot (+4σ) ověřeny pozemně lokální koncentrace až 200 ppm U



Obr. 55. Výsledky letecké spektrometrie gama při opakovaném měření přes polohy fosfátů oblasti ložiska Oued Zem, Maroko. Registrované hodnoty K, U, Th opraveny na primární záření a Comptonův rozptyl  
 $h$  — výška letu, TC — úhrnná aktivita gama

#### 6.4 Metody jaderné geofyziky

Význačné jaderné vlastnosti některých prvků a fyzikální parametry hornin umožňují jejich stanovení metodami jaderné geofyziky.

#### 6.4.1 Gama-gama metoda

Při ozáření hornin externím zdrojem záření gama je výsledné pole  $I$  záření gama závislé na aktivitě  $A$  zdroje, energii  $E_0$  emitovaných kvant gama a na složení horniny, které charakterizuje efektivní hodnota atomového čísla  $Z_{ef}$ :

$$I = f(A, E_0, Z_{ef}). \quad (6.22)$$

Typ interakce záření gama s hmotou závisí na  $E_0$  a  $Z$ . Při výběru vhodné energie záření zdroje ( $E_0 > 0,2$  MeV) převládá v horninách *Comptonův rozptyl*, jehož makroskopický účinný průřez je funkcí hustoty  $\rho$  hornin. Pro danou aparaturu a sondu platí

$$I = Af(\rho), \quad (6.23)$$

kde  $A$  je aktivita zdroje.  $Z$  měřené hodnoty lze stanovit *hustotu*  $\rho$  hornin. Jako zdroje se užívají  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{60}\text{Co}$ . Zdroj umístěný v sondě se vpichuje do hloubky 0,5 m pod povrch; délka sondy  $l$  je 0,2 až 0,3 m. Hloubkový dosah metody je 15 cm; lze stanovit rozdíly  $\rho$  0,1 až 0,01 g cm<sup>-3</sup>.

Při použití zdroje měkkého záření gama ( $E_0 < 0,2$  MeV) převládá v hornině *fotoefekt* a měřené pole je význačně závislé na složení hornin ( $Z_{ef}$ ). Při použití zdrojů  $^{170}\text{Tl}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{241}\text{Am}$  lze stanovit v horninách *obsahy těžkých prvků*.

Metoda gama—gama je závislá na pórovitosti a zrnitosti měřených hornin.

#### 6.4.2 Rentgenofluorescenční metoda

Při ozáření analyzované horniny zdrojem gama záření o nízké energii ( $E_0 \sim$  do 150 keV) je většina kvant absorbována *fotoefektem* na elektronových sférách K, L atomů a přechod atomů ze vzbuzeného stavu je provázen emisí charakteristického záření. Jeho energie  $E$  je závislá na atomovém čísle  $Z$  prvku,

$$\sqrt{\frac{E}{h}} = a(Z - b). \quad (6.24)$$

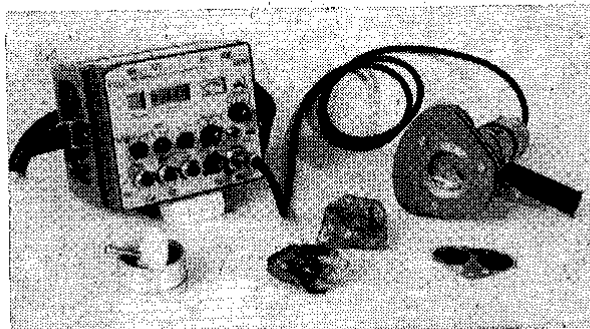
Určením energie charakteristického záření a jeho intenzity lze prvky kvalitativně a kvantitativně stanovit. Podle elektronové sféry, na které nastal fotoefekt, je emitováno charakteristické záření K nebo L série; emise série se dělí na linie  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Intenzivními signály se vyznačují linie  $K_{\alpha 1}$  (tab. 17).

Tabulka 17. Konstanty charakteristického záření

Prvek	Z	K — série			L — série		
		$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	$K_{\beta 1}$	$L_{\alpha 1}$	$L_{\beta 1}$	$L_{\gamma}$
		keV	keV	keV	keV	keV	keV
Zn	30	8,638	8,615	9,571	1,009	1,032	
Sn	50	25,270	25,042	28,483	3,444	3,662	4,131
U	92	98,428	94,648	111,289	13,613	17,218	20,163

Každý prvek emituje více linií charakteristického záření, a proto výsledné spektrum je složité. Ke stanovení charakteristického záření analyzovaného prvku se v terénních podmínkách užívá technika *dvojice absorpčních filtrů*. Prvý žádanou energii charakteristického záření propouští, druhý nepropouští. Rozdíl výsledků měření s prvním a druhým filtrem ( $\Delta n$ ) odpovídá intenzitě charakteristického záření.

*Přenosný rentgenofluorescenční analyzátor* se skládá ze sondy s izotopickým zdrojem, s filtry a detektorem, a z analyzátoru impulsů (obr. 56). Výsledky analýz jsou ovlivněny složením matrice horniny, strukturou rudy, proměnností koncentrace prvků s blízkými energiemi emise záření a geometrií měření. Pro vyloučení nepříznivých vlivů matrice lze užít metody spektrálních poměrů. Údaje  $\Delta n$  ( $s^{-1}$ ) naměřené v krátkých záměrech (desítky sekund) se převádějí na koncentraci podle cejchovací křivky.



Obr. 56. Přenosný rentgenofluorescenční analyzátor NE 5017 se sondou M 8563 a výměnnými absorpčními filtry (foto R. Duda)

Rentgenofluorescenční analýzou lze v terénních podmínkách stanovit prvky se  $Z > 24$ . Mez stanovitelnosti je 0,01 až 0,3 %, měření na jednom bodě je kratší než 1 minuta. Malý hloubkový dosah metody 2 až 15 mm je podmíněn nízkou energií charakteristického záření.

#### 6.4.3 Metoda jaderné gama rezonance

Metoda jaderné gama rezonance je založena na *Mössbauerově jevu*. U mössbauerovských jader atomů platí, že při emisi i absorpci kvant gama je kinetická energie  $E_k$  odraženého jádra atomu rovna nule. Důsledkem je, že při interakci neztrácejí kvanta gama svoji energii a v měřeném spektru energií se objeví význačné linie. Jaderná gama rezonance nastává na mössbauerovských jádrech pouze při absorpci kvant gama rezonanční energie. Pohybem izotopického zdroje sloužícího k ozařování analyzované horniny lze jeho energii emise jemně měnit a dosáhnout energie rezonanční.

Metoda jaderné gama rezonance slouží ke *stanovení kasiteritu*. Jako zdroj se užívá  $^{119m}\text{Sn}$  ( $E_0 = 23,8$  keV). Měří se signál s nulovou rychlostí zdroje ( $E$  rezonance) a zvolenou rychlostí pohybu zdroje. Rozdíl dvou měření je úměrný koncentraci  $\text{SnO}_2$ . Citlivost metody je 0,1 % Sn, hloubkový dosah metody je do 2 mm. Pro analýzy Fe slouží zdroj  $^{57}\text{Co}$  ( $E_0 = 14,4$  keV).

#### 6.4.4 Gama-neutron metoda

*Stanovení berylia* (Be) je založeno na reakci ( $\gamma, n$ ). Tato reakce vzniká při energii kvant gama větší, než je vazebná energie neutronu v jádře atomu. Be má prahovou energii (1,67 MeV) nižší než jiné prvky. Při použití izotopického zdroje  $^{124}\text{Sb}$  ( $E_0 = 1,69$  MeV) lze podle toku uvolněných neutronů Be selektivně určovat.

Výsledná hustota toku neutronů závisí na intenzitě budícího izotopického zdroje, koncentraci Be, hustotě horniny a na koncentraci prvků s vysokým účinným průřezem pro záchyt tepelných neutronů (B, Li, Cd). *Beryloметр* se skládá

ze sondy s izotopickým zdrojem  $^{124}\text{Sb}$  a detektorem a měřicího bloku. Mez stanovitelnosti je řádu  $10^{-3}$  až  $10^{-4}$  % Be, hloubkový dosah metody je 0,2 m. Výsledky měření se převádějí na koncentraci Be podle cejhovací křivky.

#### 6.4.5 Neutron-neutron metoda

Při ozáření analyzované horniny zdrojem neutronů nastává jejich zpomalení a záchyt. Pro zpomalení neutronů do energie neutronů tepelných je nejvýznamnější přítomnost H, pro záchyt neutronů jsou významné B, TR, Li, Cl aj.

Na termalizaci rychlých neutronů zdroje je založena *metoda stanovení vlhkosti hornin*. Zkoumaná hornina je vystavena toku rychlých neutronů zdroje; v hornině vzniká pole neutronů nadteplných a tepelných, které se detekují. S rostoucí vzdáleností od zdroje neutronů pole tepelných neutronů nejprve roste (termalizací), kulminuje, a pak klesá (záchytem tepelných neutronů). Přenosné přístroje pracují s délkami sond o přímé úměrnosti mezi měřeným polem nadteplných nebo tepelných neutronů a vlhkostí horniny. Sondy vlhkoměrů obsahují zdroj neutronů a detektor; při měření se umísťují do země. Naměřený signál se převádí na hodnoty objemové vlhkosti podle cejhovací křivky. Metodou lze určovat hodnoty vlhkosti v mezích 0,02 až 0,5 g  $\text{H}_2\text{O}$  na  $1 \text{ cm}^3$ , mez stanovitelnosti je přibližně 0,01 g  $\text{H}_2\text{O}$  na  $1 \text{ cm}^3$ , hloubkový dosah 20 až 25 cm.

Na základě vysokého účinného průřezu záchytu neutronů lze z povrchových měření stanovit *obsah boru* (B) v horninách. K ozáření hornin se užívá zdroj rychlých neutronů, detekují se neutrony tepelné. Stanovení B je rušeno přítomností Cl, Fe a H. Doplnkovým měřením gama kvant emitovaných při záchytu neutronů chlorem lze na přítomnost Cl zavést opravu. Mez stanovitelnosti metody je přibližně 0,01 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , hloubkový dosah 25 cm.

#### 6.4.6 Neutronová aktivační analýza

Aktivační analýza je založena na aktivaci vzorku jadernými částicemi nebo kvanty gama a měření jaderného záření uměle vzbuzeného radionuklidu. Podle kvality a kvantity měřeného pole lze určit přítomnost výchozího terčového prvku.

Při ozáření analyzované horniny tokem jaderných částic  $\varphi$  se atomy  $N^*$  umělého radionuklidu hromadí. Aktivita radionuklidu vzniklého ozařováním po dobu  $t_a$  je

$$A(t_a) = \varphi \sigma N [1 - \exp(-\lambda t_a)], \quad (6.25)$$

kde  $\sigma$  je účinný průřez jaderné reakce a  $N$  koncentrace atomů terčového prvku. Měří se obvykle po době  $t_0$  po ukončení aktivace (doba vymírání),

$$A(t_a, t_0) = A(t_a) \exp(-\lambda t_0). \quad (6.26)$$

Doba  $t_0$  se volí s ohledem na snížení signálu rušivých prvků.

Neutronová aktivační analýza je v terénu použitelná pro stanovení Al, V, Co, Mn, prakticky pro stanovení F, popřípadě Cu. Účinné průřezy reakcí a nízké koncentrace analyzovaných prvků vyžadují použití velmi aktivních zdrojů neutronů, s nimiž je manipulace při povrchovém měření v terénu obtížná.

#### 6.4.7 Použití metod jaderné geofyziky v geologii

Laboratorní analýzy horninových vzorků nelze vždy realizovat v požadovaném množství, čase a místě terénních výzkumů. Metody založené na měření vzbuzených polí jaderného záření mají uplatnění při *vzorkování odkrytých geologic-*

kých objektů měřením in situ. Nižší přesnost terénních analýz je obvykle vyvážena počtem záměr a stanovením středních hodnot. Vzájemná korelace laboratorních a terénních výsledků upřesňuje stanovení prvků.

Terénní metody jaderné geofyziky se uplatňují zejména při průzkumu rud. Vzhledem k omezenému hloubkovému dosahu je jejich použití vázáno na širší komplex metod průzkumu. Orientaci při výběru metod pro stanovení jednotlivých prvků udává tab. 18.

Tabulka 18. Stanovení prvků metodami jaderné geofyziky měřením in situ

Prvek	Metoda	Hloubkový dosah (cm)	Mez stanovitelnosti (%)
Al	ANG	20—30	0,3—0,8
Fe	NG	20—30	0,1—0,3
	GG-S	3	0,4—0,5
K	XRF	< 1	0,2
	G	30	0,2
Mn	NG	20—30	0,1—0,2
	GG-S	3	0,4—0,5
Ba	XRF	< 1	0,2
	GG-S	3	0,4—0,5
F	XRF	1	0,05
	ANG	20—30	0,05—0,1
Cr	XRF	< 1	0,2
Cu	ANG	20—30	
	NG	20—30	
Ni	XRF	< 1	0,05—0,1
	NG	20—30	0,1
V	XRF	< 1	0,2
	XRF	< 1	0,2
Zn	XRF	< 1	0,1
Co	XRF	< 1	0,2
Mo	XRF	< 1	0,01—0,05
Sn	GG-S	3	0,4—0,5
	M	0,1	0,05
Be	XRF	1	0,05
	GN	20—30	0,005
Pb	GG-S	3	0,2—0,3
	XRF	< 1; 3	0,1; 0,3
Sb	GG-S	3	0,3—0,5
	XRF	1	0,05
Ag	XRF	1	0,05
W	XRF	< 1; 2	0,1; 0,3
B	NN	20—30	0,003—0,006
Th	XRF	< 1; 3	0,2; 0,3
<sup>208</sup> Tl	G	20—30	0,000 2
U	XRF	< 1; 3	0,2; 0,3
<sup>214</sup> Bi	G	20—30	0,000 1
TR	XRF	< 1—1,5	0,05—0,3

Použité symboly: A — aktivační, N — neutron, G — gama, S — selektivní, XRF — rentgeno-fluorescenční analýza, M — Mössbauerův jev

Použití otevřených zářičů řeší úkoly stanovení pohybu podzemních vod, určení porézních vrstev hornin a úložných poměrů hornin.