

Természetes gamma–spektrum és termikus neutronokkal gerjesztett gamma–spektrum mérése bizmut–germanát szcintillációs detektoros mérőrendszerrel

– Műszer– és módszerfejlesztés –

KAROTÁZS TUDOMÁNYOS MŰSZAKI ÉS KERESKEDELMI KFT.¹

Az elmúlt évtizedben fokozatosan egyre nagyobb mértékben teret nyertek a kőzetek természetes gamma sugárzásának fúrólukokban végrehajtott kvalitatív, valamint kvantitatív vizsgálati módszerei. Az egyik legfontosabb szelvényezési eljárás a kőzetek természetes gamma–sugárzásának sugárösszetétel szerinti meghatározása, a természetes gamma–spektrum mérés.

A digitális technika elmúlt időszakban végbemenő ugrásszerű fejlődése lehetővé teszi egyes technológiai megoldások geofizikai mérőrendszerekben történő alkalmazását.

A digitális adatátviteli, a számítástechnikai adatfeldolgozási eljárások teljesen új alapokra helyezték a geofizikai mérések adatátviteli módszereit, illetve a mérés során alkalmazott szoftvereket is teljes mértékben más követelmények elé állították.

Az új geofizikai mérési metodika lehetővé teszi a mérési eredmények feldolgozását, illetve az egyéb szükséges számítási eljárások, a különböző korrekciók elvégzését magában a fúrólukban levő szondában. A feldolgozott mérési eredmények digitális adatcsomagként kerülnek a felszíni adatfeldolgozó és rögzítő egységbe. A feldolgozó szoftver már a terepen lehetővé teszi a mérési eredmények azonnali kiértékelését, értelmezését a megrendelő igényeinek megfelelően. A mérési adatok digitális formában történő tárolása lehetőséget ad a terepi mérési eredmények feldolgozó központba történő azonnali továbbítására, amely lehetővé teszi az eredmények nagyon rövid időn belüli kontrollját. A megrendelő szinte a mérés befejezését követően megismerheti annak eredményeit.

The recent development of digital technique ensures the application of new technologies in geophysical measuring systems. The recent available digital data transfer and processing algorithms serve a new tool for geophysical data transfer methods and data processing software.

The developed measuring method serves the correction and processing of measured data in site, within the probe in borehole. The processed measuring results transferred into the surface recording unit in the form of digital data packages. The processing software real time evaluates the data in the site, taking into account the requirements of the user. The digital storage of data serves the real time transfer of field measurement results to the data processing centre, ensuring the immediate control of results. The user can receive the results as soon as the measurement has finished.

On respect of written above, Karotázs Ltd. developed a new calibration, measuring and data processing system, what was proved in field application several times.

¹Szerzők:

Henézi Ferenc, villamosmérnök;
Kollár László, geofizikus mérnök;
Lovas Andor, geofizikus mérnök;
Vizvári Zoltán, környezetmérnök.

1. Bevezetés

A kőzetek természetes γ -sugárzásának energiaszelektív regisztrálását természetes γ -spektroszkópiának nevezzük. A kőzetek radioaktivitását a bennük felhalmozódott természetes eredetű radionuklidok – elsősorban az urán (^{235}U , ^{238}U), tórium (^{232}Th) és bomlástermékeik, valamint a kálium (^{40}K) – okozzák. A radioaktív elemek bomlási formái közül – az α -, β -sugárzások kicsi áthatolóképessége, illetve gyors elnyelődése miatt – fúrólukban hatékonyan csak γ -sugárzás mérhető.

Természetes körülmények között a kőzetek radioaktív elemtartalmát legjobban a γ -sugárzása jellemzi. A földtani kutatások során legáltalánosabban alkalmazott radioaktivitáson alapuló geofizikai vizsgálati módszer a γ -sugárzás integrál dózisintenzitásának mérése, a természetes γ -spektrum szelvényezés.

Az észlelt γ -sugárzás kvalitatív, illetve kvantitatív összetételének megállapítása megmutatja, hogy mely radioaktív elemek milyen arányban járulnak hozzá a vizsgált kőzet természetes radioaktivitáshoz, valamint meghatározható az aktív anyagok mennyiségi aránya is.

1.1. Előzmények

A Karotázs Kft. a természetes és neutronforrásokkal gerjesztett γ -sugárzások energiaszelektív detektálására, műszer- és módszerfejlesztési pályázatot nyert (GVOP-3.3.3-05/1-2005-05-0123/3.0), a 2005. október 01. – 2007. szeptember 30. közötti időszakban.

Az elnyert projekt több részből állt:

1. A γ -spektrum mérés tudományos-technikai alapjai, korszerű eszközei (tanulmány), karotázs szelvényező berendezés tervezése, megvalósítási javaslatok. A γ -spektrum szelvényező (karotázs) berendezés elkészítése (szonda, felszíni egység), beüzemelése.
2. Kalibrálási metodika kidolgozása, a szelvényezések minőségbiztosítása.
3. γ -spektrum szelvényezések, esettanulmányok, integrált értelmezés.
4. Neutronokkal gerjesztett elemek γ -spektrum mérésének kidolgozása, a mérések értelmezése.

1.2. A gamma-sugárzás tulajdonságainak rövid összefoglalása

A γ -sugárzás során a gerjesztett állapotú atommag alacsonyabb energiájú állapotba kerül, és az energiakülönbség nagyenergiájú (keV – MeV tartomány) foton kisugárzásával távozik. A gerjesztés lehet természetes, vagy mesterséges eredetű. A γ -sugárzás hatótávolsága a levegőben több 100 m, a nagy tömegszámú elemek gyengítik hatékonyan. A sugárzás során nem változik meg a sugárforrás tömegszáma és rendszáma. E sugárzástípus gyakran kísérelő sugárzása más, részecske emisszióval járó bomlásnak, mely során a keletkezett leányelem gerjesztett állapotban marad vissza. E gerjesztett atommagok bocsátják ki később a fotonokat. [VÁRHEGYI, GORJÁNÁCSZ, 2006]

A γ -sugárzás vonalas spektrumú, ún. karakterisztikus sugárzás, melynek energiája jellemző a kibocsátó kémiai elemek izotópjaira. Detektálása során a fotonok egy alkalmasan megválasztott közegen (mely spektrális γ -szelvényezés esetén valamilyen szcintillációs detektor) haladnak át, miközben ionizálják azt. A detektor gyakran NaI(Tl), vagy Ge(Li) – Si(Li) detektor. [FEDOR 2007]

Mivel a γ -sugárzás elektromágneses sugárzás, töltéssel és nyugalmi tömeggel nem rendelkezik. Ennek megfelelően, a kölcsönhatás formái teljesen eltérőek a töltött részecskéitől. A

sugárzás fotonjai kölcsönhatásba léphetnek a reagáló anyag atommagjaival, héjelektronjaival, a nuklidok Coulomb-terével, majd ennek következtében rugalmasan vagy rugalmatlanul szóródhatnak és abszorbeálódhatnak is. A kölcsönhatások a sugárzás intenzitásának gyengülését idézik elő. A kölcsönhatás legfontosabb típusai: fotoeffektus, Compton-szórás, illetve párképződés. [VÁRHEGYI, GORJÁNÁ CZ, 2006]

2. A mérőrendszer

A mérőrendszer fő elemei:

1. hardver egységek;
2. működtető (kalibráló és mérő) szoftver.

A γ -spektrum szelvényező mérőrendszer hardver egységei a következő fő részekből állnak:

- gamma-spektrummérő szonda;
- karotázs kábel;
- felszíni egység.

A γ -spektrummérő szonda 80 °C-t nem meghaladó talphőmérséklet esetén energiaszelektív szcintillációs detektoros sugárzásmérést tesz lehetővé. [KAROTÁZS, I. kötet]

A mérés elve: a szcintilláló anyagba (esetünkben bizmut-germanát $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, továbbiakban BGO) behatoló sugárzás (esetünkben γ -fotonok) energiáját részben, vagy egészben leadja, a γ -fotonok energiájával arányosan gerjeszti a szcintillátort. A leadott energia fluoreszcencia-fotonok formájában emittálódik. A detektor fontos tulajdonsága, hogy az így felszabaduló fotonokra átlátszó. Az emittált fényjel opto-elektronikai erősítése fotoelektron-sokszorozóval (FES) történik. A szcintillátorból a fotokatódra érkező fotonok fotoelektronokat hoznak létre, amelyeket úgy irányítanak, gyorsítanak, hogy elérjék a FES első dinódáját. A FES dinódarendszerében a fotoelektronok számától függő töltésimpulzus, ennek hatására az anódján feszültségimpulzus keletkezik. [NAGY LAJOS-LÁSZLÓ KRISZTINA, 1997]

Az impulzusok amplitúdóját digitalizáljuk és minden kvantálási szinthez egy memóriarekeszt rendelünk (sokcsatornás amplitúdó-analizátor). A vízszintes tengelyen az energiát ábrázoljuk keV-ben, a függőlegesen pedig a ΔE energiacsatornában begyűjtött relatív impulzusok gyakoriságát. Ily módon ábrázolva kirajzolódik a nukleáris spektrumgörbe, melyeknek csúcsai (maximumai) alapján nuklidazonosítás is történhet. (4.2. ábra)

A DSP (digitális jelfeldolgozás) technika alkalmazásával több száz mintát veszünk a szcintillációs impulzusból és szűrési, csúskeresési algoritmusokkal határozzuk meg a pontos amplitúdót. Így pontosabban, stabilabban végezhető el a mérés.

A karotázs méréseknél probléma forrása lehet a mérési adatok továbbítása a hosszú kábel, ezért célszerűen a teljes jelfeldolgozás a szondában történik, majd a felvett spektrumot digitális adatsomagként a felszíni adatgyűjtő egységbe továbbítjuk. A széles üzemi hőmérséklet-tartomány miatt automatikus spektrumstabilizálás alkalmazása is szükséges.

Szcintillációs detektorként BGO kristályt alkalmazunk, ugyanis bizmut-germanát kristály fizikai paraméterei (a NaI(Tl) kristálynál jelentősen nagyobb sűrűsége) miatt a magasabb energiatarományban jobb energiafelbontást, nagyobb hatásfokot biztosít. [KAROTÁZS KFT., I. kötet]

A projekt megvalósítása során szoftverfejlesztésre is sor került. Az elkészített program a energiaablak-határok – melyeket a tartalomszámításhoz használ föl – megadásával alkalmas a

mérőrendszer automatikus kalibrálására. Továbbá, kalibráló etalon–modellekben történő méréssel határozza meg a spektrális koeficienseket (stripping–faktorok), amelyeket digitálisan tárol. A mérések során megjeleníti az energiaablakokban gyűjtött impulzusszámokat, kiszámítja a meghatározni kívánt sugárzóanyag–koncentrációkat (K, U, Th, illetve aktivációs mérésnél esetlegesen Na vagy Al), valamint (választhatóan) ezeket szelvényen ábrázolja. Természetesen lehetőséget nyújt a rögzített spektrumok, szelvények utólagos szerkesztésére és exportálására különböző fájlformátumokba.

3. A gamma–spektrum mérőrendszer kalibrálása

A kalibrálás célja spektrális koeficiensek meghatározása, amelyek a gyakorlati terepi mérések alkalmával felvett γ –spektrumok kiértékelése során végzendő tartalomszámítások alapvető adatait képezik. A spektrális koeficiensek azt fejezik ki, hogy egységnyi anyagmennyiség (radioelem–koncentráció) hatására mekkora impulzusszám jön létre az adott detektor, adott energiaablak esetén. [KAROTÁZS, II. kötet]

3.1. Kalibráló tömbök készítése

A gamma–spektrum mérőrendszer kalibrálása etalon–modellek segítségével lehetséges. Az alapvetően uránérckutató céljaira készített kalibráló etalon–tömbök radioaktív anyag tartalma többszöröse a környezetvédelmi feladatokhoz célszerűen alkalmas modelleknek, ezért új etalon–modellek elkészítése mellett döntöttünk.

A kalibráló etalon–tömbök határoló felületeit műanyagból alakítottuk ki, ami a felmerülő más etalon–modell tervezési alternatívákhoz képest tömeg– és költség–csökkenést eredményezett. Az alkalmazott kemény PVC (PVC–U) csövek anyaga vegyszer– és korrózióálló, lágyítószermentes polivinil–klorid. Ezáltal a tervezés jelentős mértékben leegyszerűsödött, statikai méretezést nem igényelt.

A Karotázs Kft. által megadott fő paraméterek alapján a műszaki terveket és az etalon–modellek tartószerkezetét a Depcom Bt. készítette el. (3.1. ábra)

A felhasznált anyagok: [KAROTÁZS, II. kötet]

- PVC henger (átmérő: 315 mm, falvastagság: 7,7 mm);
- PVC cső (átmérő: 75 mm, falvastagság: 3,6 mm);
- műanyag zárólapok (355 × 355 × 20 mm, az átlók metszéspontjában 63 mm átmérőjű furattal);
- a fedőlapokat összekötő 4 db, egyenként műanyag csőbe helyezett fémrúd biztosítja a stabil rögzítést és a mobilizálhatóságot.

A kalibráló etalon–modellek térfogata (külön–külön) $\sim 35 \text{ dm}^3$.

A karotázs mérőműszerek kalibrációja céljából 4 db (egy U–Ra, egy Th, egy K és egy háttér) etalonanyag elkészítésére került sor. Az urán–rádium (U–Ra), és a tórium (Th) alapanyagául szolgáló anyagok radioaktív egyensúlyi állapotban lévő ércőrlemények felhasználásával készültek (ezeket korábban a Mecseki Ércbányászati Vállalat által készített etalonanyagok előállítására használták). Az ércőrleményeket szárítószekrényben 105 °C–on szárították, majd törés, őrlés után tiszta kvarchomokkal keverték és homogenizálták. A keverék egyenletes 1 mm alatti szemcsemérettel jellemezhető, homogenitását az anyag szűrőpróbaszerű megmintázását követő fajlagos aktivitásmérésekkel ellenőrizték. A homogenizálást addig folytattuk, amíg 3 egymást követő minta fajlagos aktivitásának eltérése 5 %–on belül adódott. A kálium (K) etalon alapjául a kereskedelmi forgalomban beszerezhető műtrágya szolgált. A

háttér etalon (H) alapanyaga aktív elemeket nem tartalmazó kvarchomok. Az elkészített etalonanyagok radionuklid-összetételét félvezető detektoros γ -spektrometriai eljárással a Mecsekérc Zrt. laboratóriumában mérettük be. Ennek során az U-Ra etalonmintát speciális mintaedényekben hermetikusan lezárták a ^{226}Ra és ^{222}Rn közötti radioaktív egyensúly biztosításához és 3 hét kivárással végezték el a spektrumfelvételt. [KAROTÁZS, II. kötet]

A γ -spektrometriai bevizsgálás alapján az etalonanyagokra az alábbi mennyiségi elemkoncentrációkat adtak meg $\pm 5\%$ -os relatív hibával: [KAROTÁZS, II. kötet]

Etalon-modellek	Elemtartalom		
	Kálium (K) [m/m%]	Urán (U – Ra) [(m/m) ppm]	Tórium (Th) [(m/m) ppm]
Kálium (K)	47,1	0	0
Urán (U – Ra)	< 1,7	106	< 6
Tórium (Th)	< 0,01	0	198
Háttér (H)	< 0,2	< 0,2	< 0,6

3.1. táblázat: A KAROTÁZS Kft. kalibráló etalon-modelljeinek radionuklid-tartalom adatai

Table 3.1. Radionuclide content of standard models used by Karotázs Ltd.

Általánosságban elmondható, hogy a modellek a γ -sugárzás szempontjából telített rétegben készülnek, azaz a rétegvastagság növelésével a mért beütésszám már nem növekszik. A kalibrált műszerek időszakos ellenőrzésére kisebb méretben készült, telítetlen modelleket is alkalmaznak. Ilyenek a gazdaságosságra és mobilizálhatóságra tekintettel a KAROTÁZS Kft. kalibráló etalon-modelljei is. Emiatt szükséges a telítetlen modellekben mért impulzusszámok korrekciója, amit a kalibráló szoftver automatikusan elvégez.



3.1. ábra: A mérőrendszer kalibrálásához használt etalon-modell

Fig. 3.1. Standard model used for the calibration of measuring system

3.2. Elméleti megfontolások

A kalibrálás első lépéseként méréseket kell végeznünk minden tömbben. A kalibráló mérések elvégzésével rendelkezésünkre állnak az energiaablakokban mért háttérkorrigált, időegységre normált impulzusszám adatok, az etalonok elemkoncentráció értékei ismertek, és ezekből az ismeretlen spektrális koeficiensek kiszámíthatók. Feltételezzük a radionuklid koncentrációk és az energiaablakokban mért beütésszámok (impulzusszámok) lineáris kapcsolatát, valamint az egyes sugárzó elemektől származó hatások szuperpozícióját.

Az általunk alkalmazott energiaablak határokat a következő táblázat foglalja össze (zárójelben a domináns sugárzást kibocsátó nuklid):

Energia- ablak (izotóp)	Energiaablak szélesség [KeV]
K (^{40}K)	1350 – 1602
U (^{214}Bi)	1608 – 2010
Th (^{208}Tl)	2346 – 2850

3.2. táblázat: A KAROTÁZS Kft. által alkalmazott energiaablak szélességek

Table 3.2. Energy windows applied by Karotázs Ltd.

A következőkben a spektrális koeficiensek (stripping faktorok) számításának egyik módját mutatjuk be 4 elem, 4 energiaablak esetében. A 4 elem közül három jelen esetben a K, U, Th, a negyedik pedig tetszőleges nuklid. Az első 3 energiaablak ennek megfelelően került kijelölésre (ld. 3.2. táblázat), a negyedik energiaablak határait pedig a tetszőleges nuklid radioaktivitásának tulajdonságai határozzák meg. Így például a tórium etalon kálium energiaablakában mért impulzusszám az alábbiakból adódik össze: [KAROTÁZS, II. kötet]

$$M_{13} \cdot sp_{11} + M_{23} \cdot sp_{12} + M_{33} \cdot sp_{13} + M_{43} \cdot sp_{14} = I_{13}$$

ahol

- M_{ij} a kalibrációs etalonok elemtartalom adatai a laboratóriumi mérések alapján ($i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 4$);
- sp_{ij} a kalibráció során az egyes energiaablakokra vonatkozó számítható spektrális koeficiensek (stripping faktorok).
- I_{ij} a kalibráció során az egyes energiaablakokban meghatározott impulzusszámok;

Ebben az esetben a M_{13} a tórium tömb kálium tartalmát jelenti, továbbá a sp_{11} az egységnyi kálium tartalom hatására létrejövő, kálium energiaablakban mért impulzusszám. A két érték szorzata pedig a tórium tömb kálium energiaablakban mért impulzusszámot fejezi ki. Az összeg többi további tagjai ennek megfelelően az adott energiaablakokban adódó impulzusszámot fejezik ki. Mivel etalononként 4 energiaablakot határoztunk meg és 4 darab etalonban mérünk, ezért 16 a fentihez hasonló (egymástól független) egyenlet írható fel, amely 16 ismeretlent (spektrális koeficienseket) tartalmaz. Így az egyenletrendszer megoldható. [KAROTÁZS, II. kötet]

A kalibrációs eljárás során alkalmazott lineáris egyenletrendszer mátrix formában:

$$[M_{ij}] \cdot [sp_{ij}] = [I_{ij}]$$

A mátrix formájú lineáris egyenletrendszer (futóindexek nélkül):

$$\begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} sp_{11} & sp_{12} & sp_{13} & sp_{14} \\ sp_{21} & sp_{22} & sp_{23} & sp_{24} \\ sp_{31} & sp_{32} & sp_{33} & sp_{34} \\ sp_{41} & sp_{32} & sp_{34} & sp_{44} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} \\ I_{41} & I_{42} & I_{43} & I_{44} \end{vmatrix}$$

A kalibrálás során a tartalom–mátrix ismeretében és az impulzus–mátrix mérésével a spektrális koefﬁciensek mátrixát kívánjuk meghatározni. [KAROTÁZS, II. kötet]

A tartalomszámítás során pedig a kalibrálással meghatározott spektrális koefﬁcienseket használjuk fel az alábbi elsőfokú, négy ismeretlenes, lineáris, inhomogén egyenletrendszer megoldására:

$$\begin{aligned} M_1 \cdot sp_{11} + M_2 \cdot sp_{12} + M_3 \cdot sp_{13} + M_4 \cdot sp_{14} &= I_1 \\ M_1 \cdot sp_{21} + M_2 \cdot sp_{22} + M_3 \cdot sp_{23} + M_4 \cdot sp_{24} &= I_2 \\ M_1 \cdot sp_{31} + M_2 \cdot sp_{32} + M_3 \cdot sp_{33} + M_4 \cdot sp_{34} &= I_3 \\ M_1 \cdot sp_{41} + M_2 \cdot sp_{42} + M_3 \cdot sp_{43} + M_4 \cdot sp_{44} &= I_4 \end{aligned}$$

Ezt mátrix alakban fölírva:

$$\begin{vmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} sp_{11} & sp_{12} & sp_{13} & sp_{14} \\ sp_{21} & sp_{22} & sp_{23} & sp_{24} \\ sp_{31} & sp_{32} & sp_{33} & sp_{34} \\ sp_{41} & sp_{32} & sp_{34} & sp_{44} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{vmatrix}$$

Azaz

$$[M_i] \cdot [sp_{ij}] = [I_i]$$

ahol

M_i a mérésel meghatározni kívánt elemtartalmak ($i = 1, \dots, 4$);

sp_{ij} a kalibráció során meghatározott spektrális koefﬁciensek ($i = 1, \dots, 4$; $j = 1, \dots, 4$);

I_i a mérés során az egyes energiaablakokban meghatározott, időegységre normált impulzusszámok ($i = 1, \dots, 4$).

Ezek alapján például a kálium tartalmat (M_1) az egyes energiaablakokban mért időegységre normált impulzusszámok (I_i) és a spektrális koefﬁciensek (sp_{ij}) segítségével a következőképpen határozzuk meg: [KAROTÁZS, II. kötet]

$$\begin{aligned}
M_1 = & \frac{I_1 \cdot [(sp_{22} \cdot sp_{33} \cdot sp_{44} + sp_{23} \cdot sp_{34} \cdot sp_{42} + sp_{24} \cdot sp_{32} \cdot sp_{43}) - (sp_{23} \cdot sp_{32} \cdot sp_{44} + sp_{22} \cdot sp_{34} \cdot sp_{43} + sp_{24} \cdot sp_{33} \cdot sp_{42})]}{D} + \\
& + (-1) \cdot \frac{I_2 \cdot [(sp_{12} \cdot sp_{33} \cdot sp_{44} + sp_{13} \cdot sp_{34} \cdot sp_{42} + sp_{14} \cdot sp_{32} \cdot sp_{43}) - (sp_{13} \cdot sp_{32} \cdot sp_{44} + sp_{12} \cdot sp_{34} \cdot sp_{43} + sp_{14} \cdot sp_{33} \cdot sp_{42})]}{D} + \\
& + \frac{I_3 \cdot [(sp_{12} \cdot sp_{23} \cdot sp_{44} + sp_{13} \cdot sp_{24} \cdot sp_{42} + sp_{14} \cdot sp_{22} \cdot sp_{43}) - (sp_{13} \cdot sp_{22} \cdot sp_{44} + sp_{12} \cdot sp_{24} \cdot sp_{43} + sp_{14} \cdot sp_{23} \cdot sp_{42})]}{D} + \\
& + (-1) \cdot \frac{I_4 \cdot [(sp_{12} \cdot sp_{23} \cdot sp_{34} + sp_{13} \cdot sp_{24} \cdot sp_{32} + sp_{14} \cdot sp_{22} \cdot sp_{33}) - (sp_{13} \cdot sp_{22} \cdot sp_{34} + sp_{12} \cdot sp_{24} \cdot sp_{33} + sp_{14} \cdot sp_{23} \cdot sp_{32})]}{D}
\end{aligned}$$

ahol

M_1 a kálium tartalom [m/m%];

sp_{ij} a kalibráció során meghatározott spektrális koefficiensek ($i = 1, \dots, 4$; $j = 1, \dots, 4$);

I_i a mérés során az egyes energiaablakokban meghatározott, időegységre normált impulzusszámok ($i = 1, \dots, 4$);

D az egyenletrendszer determinánsa.

4. Gamma–spektrum mérések

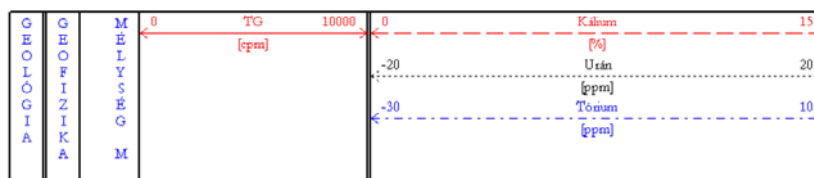
4.1. A mérések típusai

A gamma–spektrum mérőrendszer a nagyobb pontosságot igénylő pontmérésre és az anomális helyek kutatására használható folyamatos, a szonda vontatásával végzett mérésre egyaránt alkalmas. Ezeket a következőkben ismertetjük.

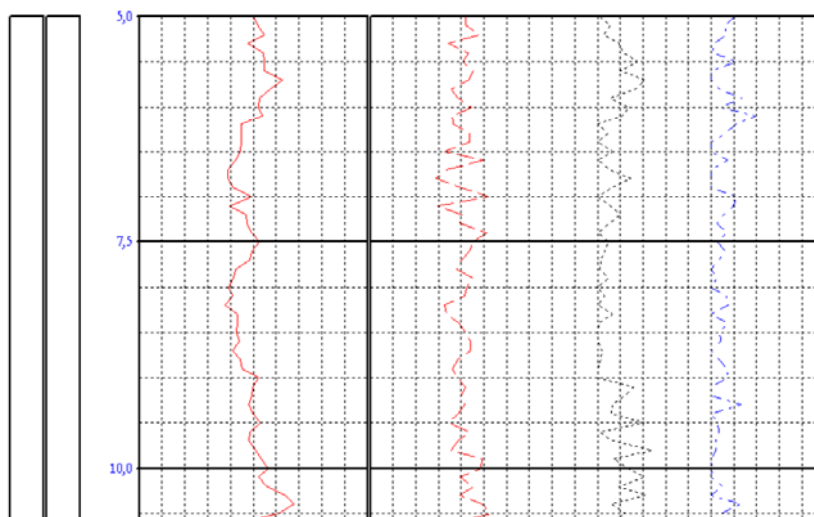
4.1.1. Folyamatos spektrummérés

A mintavételezés megadott időközönként vagy megadott távolságonként történik. Ténylegesen két időpont között folyamatosan történik a regisztrálás. Az adatgyűjtés 9 biten zajlik, amely 512 csatornát képes kezelni. A mérés a teljes γ –foton energiatartományban (0 – 3 MeV) történik. A csatornában mért impulzusszámok a programból az energiaablak határok között összevonhatók, így különféle műveleteket lehet velük elvégezni a későbbi értelmezés céljából. A feldolgozó program az egyes energiaablakokra azonnal kiszámolja a tartalom értékét. Egy feldolgozási ciklus az adatsor megjelenítésével zárul, majd új mérés ciklus veszi kezdetét, onnan újra indul az adatgyűjtés. [KAROTÁZS, I. kötet]

A KAROTÁZS Kft. által használt National Instruments (NI) kártyával történő adatfeldolgozást a bemenő adatok megadását követően a gyárilag fejlesztett szoftver mérés közben végzi el. Egyedi tervezésű kártyánál a külső egységben történik a teljes csatornánkénti számolás, majd ezt adja tovább a külső egység a számítógép felé, a vezérlő programnak.



Méretarány 1:50

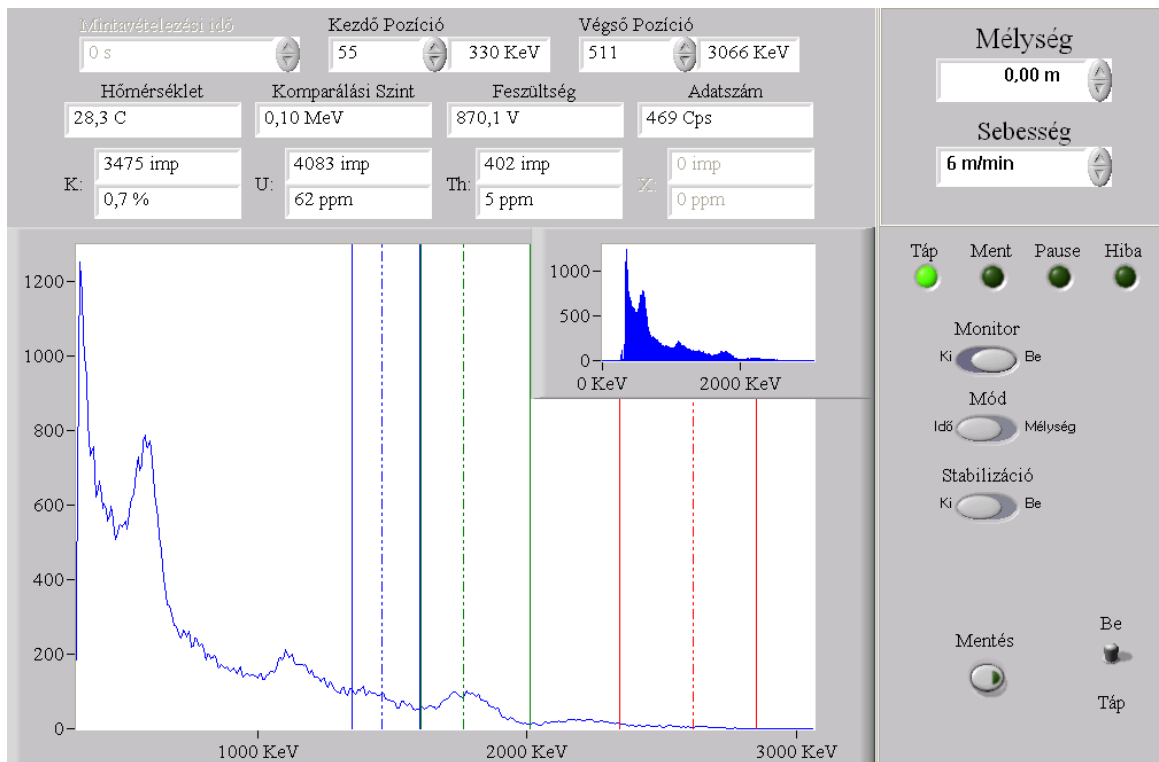


4.1. ábra: A mérőrendszerrel a III. számú meddőhányón készített tartalom-szelvény (szelvény részlet)

Fig. 4.1. Radionuclide concentration log registered on waster rock pile No. III.

4.1.2. Spektrum pontmérés

Ennek során a mintavételezés tetszőlegesen megadott pontokban történik tetszőlegesen beállítható ideig. Ez az előző méréstípussal ellentétben nagyobb pontosságú, de időigényesebb. Ebben az esetben is 9 bites felbontást alkalmazunk, vagyis a kijelölt méréstartomány 512 külön csatornára bontható. Az adatfeldolgozás mérés közben folyamatosan történik, a pillanatnyi változásokat grafikusán szemléltetve. [KAROTÁZS, I. kötet]



4.2. ábra: A mérőrendszerrel készített pontmérés (mérési képernyő)

Fig. 4.2. Point measurement (screen) of measuring system

A függőleges tengelyen a beütésszámot (csatornánként), a vízszintes tengelyen az energiatartományt (3 MeV –ig) ábrázoljuk. Az energiatartományt 512 darab, egyenként 6 keV–es csatornára osztottuk fel. A kalibrálás alkalmával beállított energiaablak-határokat a mérés során különböző színekkel jelenítjük meg.

4.2. Példák a mérőrendszer alkalmazására

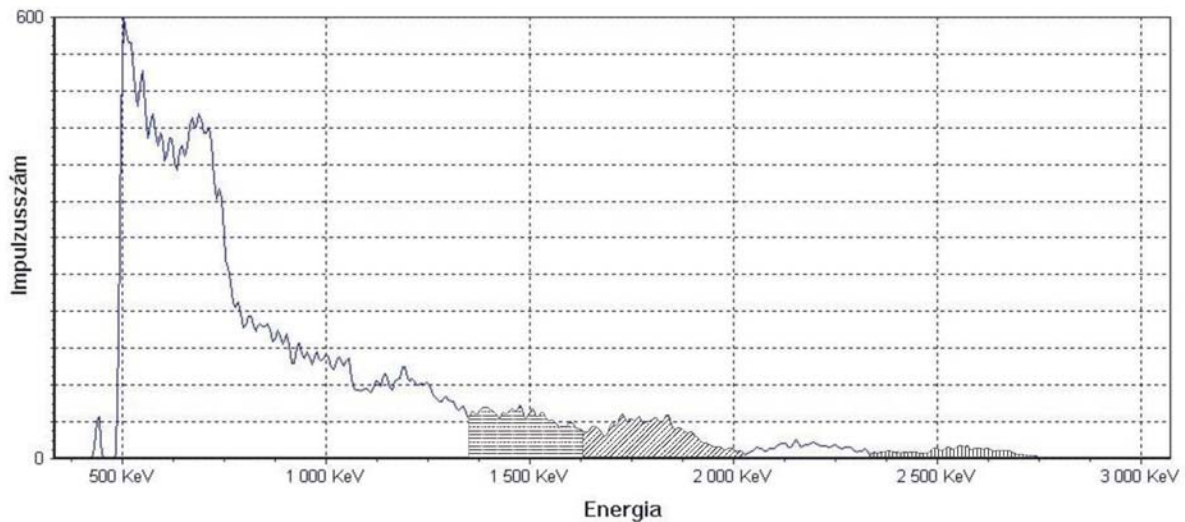
Méréseket végeztünk a Vértesi Erőmű Zrt. Oroszlányi Erőmű, illetve a Bánhidai Erőmű zagyterén az ott deponált erőműi zagyok, pernyék feldúsult természetes radioaktív anyag-talmának vizsgálatára.



4.3. ábra: Mérési előkészületek a Bánhidai Erőmű zagyterén, a Bhz-1 megfigyelőkút környezetében

Fig. 4.3. Preparation for measurement on Bánhida Power Plant tailings pond, near Bhz-1 monitoring well

Egy ilyen pontméréssel fölvevett spektrumot mutatunk be a *4.4. ábra* ábrán.



4.4. ábra: A Bánhidai Erőmű zagyterén, a Bhz-1 megfigyelőkútban, 4 m mélységben pontméréssel rögzített γ -spektrum

Fig. 4.4. γ -spectrum recorded in Bhz-1 monitoring well at 4 m depth on Bánhida Power Plant tailings pond, using point measurement

A rögzített spektrumon az U bomlási sor ^{214}Bi nuklidjának fotocsúcsa jelenik meg a legkarakteresebben (1765 KeV). A megadott mélységben volt mérhető az urán koncentrációjának maximuma, melynek értéke 62 ppm. Ezzel megegyező mélységben volt a tóriumtartalom maximuma is, ennek értéke 39 ppm. A kálium koncentrációja 3,1 m/m %.

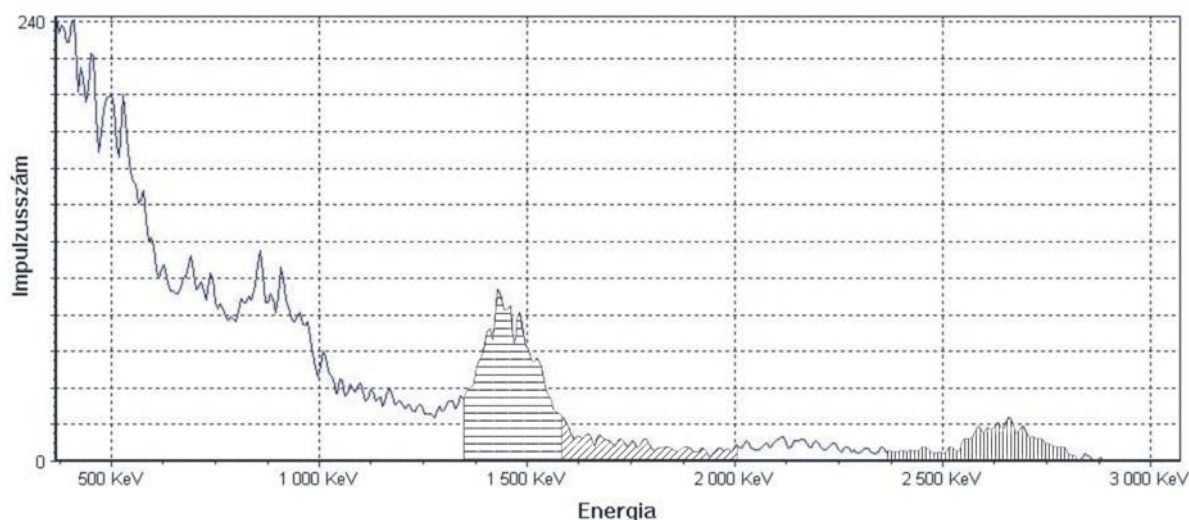
A KAROTÁZS Kft. több esetben mélyfúrás–geofizikai vizsgálatokat végzett Bátaapátiban a kis– és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezése céljából épülő hulladéktárolóban, amely a Mórági Gránit Formációban kerül kiépítésre (4.5. ábra).



4.5. ábra: Bátaapáti, a szonda betolása

Fig. 4.5. Insert of probe, Bátaapáti

A vágattengely előfúrásokban mélyfúrás–geofizikai vizsgálatokat hajtottunk végre a γ –spektrummérő műszeregységgel, amely során – többek között – a 4.6. ábrán látható γ –spektrumot rögzítettük.



4.6. ábra: Bátaapáti, BeN-3 vágattengely előfúrás, 38 m mélységben pontméréssel rögzített γ -spektrum

Fig. 4.6. Bátaapáti BeN-3 tunnel axis drilling, γ -spectrum recorded at 38 m depth, using point measurement

A Bátaapáti nyugati lejtőszakna BeN-3 előfúrás 38 m-ben mért elemkoncentrációk ($K = 4,7$ m/m%; $U = 1$ ppm (m/m); $Th = 45$ ppm (m/m)) a monzogranit (Mórágyi Gránit Formáció) jellemző sugárzóanyag-összetételét mutatják.

4.3. Neutronaktivációs fúrólukvizsgálatok

A mesterséges radioaktív izotópok létrehozását, a felaktiválást úgy végezhetjük, hogy a meghatározandó elemet tartalmazó mintát esetünkben lassú neutronokkal sugározzuk be. A végbemenő magreakciók következtében meghatározott sajátságokkal rendelkező radioizotópok keletkeznek, melyek azonosítása alapján a mintában előforduló elemek anyagi minőségére következtetni lehet.

Laboratóriumi vizsgálatoknál a kőzetmintát a megfelelő energiájú neutronok homogén fluxusába helyezik, és annyi ideig sugározzák be, hogy a meghatározandó elem radioaktív izotópjából mérhető mennyiség keletkezzen.

A neutronok hatására keletkező mesterséges izotópok mélyfúrásokban történő vizsgálata számos földtani és geokémiai feladat megoldásához nyújthat segítséget. Fúrólukokban végezhető neutronaktivációs eljárásokat dolgoztak ki alumínium, mangán, nátrium, kálium, réz elkülönítésére, esetenként koncentrációjuk tájékoztató jellegű értékelésére. [BALOGH IVÁN 1979, 1982]

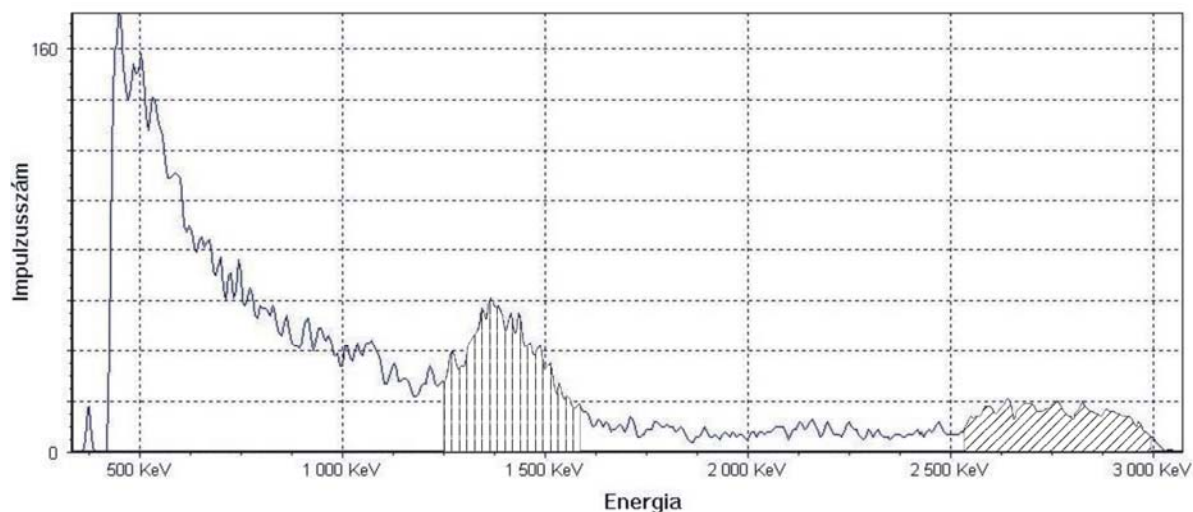
A KAROTÁZS Kft. Am-Be neutronforrással rendelkezik. Ennek felezési ideje 458 év, fajlagos neutron-kibocsátása viszonylag nagy ($3,24$ Ci/g, vagy $1,2 \cdot 10^{11}$ n/gs), így a forrás kisméretű, nagy hozamú, gyenge γ -sugárzású neutronforrás. A források préselt AmO_2 -Be tablettákból állnak, az összetevők súlyaránya 1:10. A forrás hegesztett, zárt rozsdamentes acél külső burkolattal és beforrasztott nikkelház csavarmenettel rendelkezik. [KAROTÁZS, IV. kötet]

4.3.1. Termikus neutronaktivációval meghatározható elemek

A termikus (alacsony) energiával rendelkező neutronok az atommagokkal kölcsönhatásba lépve nagy valószínűséggel neutron- γ (n,γ) reakciót hoznak létre, mivel nem rendelkeznek akkora energiával, amelyet át tudnának adni a töltött részecskének a Coulomb-gát átlépéséhez (amely az atommagból való kilépéshez szükséges).

Termikus neutronokkal aktiválható elemek, valamint a karakterisztikus (n,γ) reakcióval reagálók közül nagy gyakorlati fontossággal bíró elemek a ^{23}Na , ^{27}Al , ^{37}Cl , ^{41}K [KAROTÁZS, IV. kötet].

A módszer fő alkalmazási területe korábban a bauxitkutatás volt, az $^{27}\text{Al} \rightarrow (n, \gamma) \rightarrow ^{28}\text{Al}$ reakció alapján, de ezen kívül a módszer lehetőséget kínál a nátriumot tartalmazó kőzetalkotó komponensek kimutatására is a $^{23}\text{Na} \rightarrow (n, \gamma) \rightarrow ^{24}\text{Na}$ reakció felhasználásával. Jelentős alkalmazási lehetőségként adódott a Bodai Aleurolit Formáció (BAF) kutatása során az albit elkülönítése környezetétől a Na-tartalma alapján. A műszer- és módszerfejlesztést megkezdük. Egy ezzel kapcsolatos mérést mutat be a 4.7. ábra, amelyet az előzőekben bemutatott neutronforrással aktivált kősóban hajtottuk végre.



4.7. ábra: Aktivált kősó gamma-spektruma

Fig. 4.7. Gamma-spectrum of activated natural salt

Az 4.7. ábra ábrán jól láthatók a ^{24}Na gamma-sugárzásának két jellemző fotocsúcsa (1368 keV, 2750 keV).

Az eljárás részletes ismertetését, a gyakorlati mérési eredmények kiértékelésének bemutatását a közeljövőben tervezzük.

5. Köszönetnyilvánítás

A fejlesztés a GVOP program (GVOP-3.3.3-05/1-2005-05-0123/3.0) támogatásával valósult meg.

A KAROTÁZS Kft. köszönetét fejezi ki az alábbi személyeknek a projekt elkészítésében nyújtott hasznos tanácsokért, közreműködésért:

- Dr. Baráth István (Geoport Kft.) geofizikus mérnök, földtudomány kandidátusa,
- Dr. Majoros György (MECSEKÉRC Zrt.) geológus,

- Dr. Várhegyi András (MECSEK-ÖKO Zrt.) geofizikus mérnök,
földtudomány kandidátusa,
geofizikus szakértő,
- Szarka Rudolf (Dial Bt.) geofizikus mérnök,

FELHASZNÁLT IRODALOM

- KAROTÁZS KFT.: Gamma–spektrum karotázs kutatási, alkalmazási módszerfejlesztés, PC alapú műszerfejlesztés, környezetvédelmi célra, I. kötet, A gamma–spektrum mérés tudományos technikai alapjai, korszerű eszközei
- KAROTÁZS KFT.: Gamma–spektrum karotázs kutatási, alkalmazási módszerfejlesztés, PC alapú műszerfejlesztés, környezetvédelmi célra, II. kötet, A gamma–spektrum szelvényező berendezés kalibrálási metodikájának kidolgozása
- KAROTÁZS KFT.: Gamma–spektrum karotázs kutatási, alkalmazási módszerfejlesztés, PC alapú műszerfejlesztés, környezetvédelmi célra, III. kötet, Kísérleti gamma–spektrum mérések, szelvényezések szelvények feldolgozása, értelmezése
- KAROTÁZS KFT.: Gamma–spektrum karotázs kutatási, alkalmazási módszerfejlesztés, PC alapú műszerfejlesztés, környezetvédelmi célra, IV. kötet, A gamma–spektrum karotázs mérési eljárás fejlesztési lehetőségeinek áttekintése
- Dr FEDOR FERENC: A gamma–spektrometria földtani alkalmazásainak alapjai és lehetséges fejlesztési irányok vázlata, kéziratot jegyzet, 2007
- Dr VÁRHEGYI ANDRÁS, GORJÁNÁCS ZORÁN: Gamma–spektrum mérése karotázs berendezéssel, Pécs, kézirat, 2006
- NAGY LAJOS GYÖRGY – NAGYNÉ LÁSZLÓ KRISZTINA: Radiokémia és izotóptechnika; Egyetemi tankönyv, Műegyetemi Kiadó; 1997
- KISS DEZSŐ, QUITTNER PÁL (1971): Neutronfizika; Akadémiai Kiadó, Budapest
- JURAJ TÖLGYESSY (1965): Magsugárzás a kémiai analízisben; Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- BALOGH IVÁN (1979): Modell a bauxitok alumínium tartalmának neutronaktivációs Karotázs mérések alapján történő meghatározásához; Magyar Geofizika XXI. Évf. 1. szám
- BALOGH IVÁN, Horváth József (1982): Az Al_2O_3 tartalom mennyiségi meghatározása bauxitos fúrólukban neutronaktivációs karotázssal; Magyar Geofizika XXIV. Évf. 3. Szám