

KÖZETEK RADIOLÓGIAI VIZSGÁLATA

SZALAY SÁNDOR és FÖLDVÁRI ALADÁR

Előadta az 1950. november 28-án tartott osztályülésen

A radioaktivitás felfedezése óta nagy az érdeklődés a Földön előforduló radioaktív anyagok iránt. A radioaktív anyagok jelentős szerepet játszanak Földünk hőháztartásában, a geotermikus gradiens kialakulásában, és így érdekes kérdés a radioaktív elemek eloszlásának vizsgálata a Föld kérgét alkotó kőzetekben. Az atommagfizikai ismeretek rohamos haladása, az atommaghasadás felfedezése és az atomenergia sikeres felszabadítása ezt az érdeklődést nagymértékben fokozták. Az atomenergia sikeres felszabadítása óta az Urán az egyik igen keresett nyersanyag, amely után érdeklődéssel kutatnak a Föld legkülönbözőbb pontjain. Megvan a lehetőség arra, hogy az atommagfizikai és technológiai ismeretek kellő előrehaladásával, kellő tapasztalatgyűjtés után, az atomenergia az ipari civilizáció fejlődésében is jelentős szerepet fog nyerni. Van még egy tudományos szempont is, a geokémia szempontja. A geokémikusok *Goldschmidt* úttörő vizsgálatait után nekiláttak az egyes elemek Földünkön való elterjedése és eloszlása megállapításának. Az ilyen irányú vizsgálatok nehézsége főleg abban áll, hogy az igen kis mennyiségben (diszperz állapotban) előforduló elemek megállapítása rendkívül körülményes. Eddig főleg a spektroszkópos módszerek szolgáltatták a legfontosabb adatokat a részünkre hozzáférhető világ anyageloszlásáról.

A radioaktív elemek mennyiségének mérésére alkalmas fizikai módszerek sokkal pontosabbak és érzékenyebbek a vegyi módszereknél, és így ezeknek az elemeknek a kutatása kisebb koncentrációban is sokkal kényelmesebben végezhető el, mint más anyagoké.

*V. I. Vernadskij*¹ és főleg a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának leningrádi Intézetében kialakult világhírű iskolája² több geokémiai alaptörvényt állapított meg, amelyek az elemek körforgására (ciklusos migrációjára), vándorlására, koncentrálódására, esetleg szétszóródására vonatkoznak. E vándorlások során, melyek a Föld különböző szféráiban és a különböző geológiai korszakok folyamán — tehát térben és időben elszórtan — játszódtak le, az egyes elemek hol feldúsulnak, hol szétszóródnak. *Vernadskij* volt az, aki rámutatott arra, hogy az elemek vándorlásának körfolyamata az élők világába is belenyúlik. Az élőlényeknek is szerepük van egyes elemek felhalmozódásában. Elég, ha hivatkozunk az élőlények közvetítésével felhalmozódott széntelepekre, petróleumtelepekre, egyes tengeri élőlényekben felhalmozódó vanádiumra stb.

A fenti szempontok vezettek bennünket abban, hogy a Magyarország területén előforduló talajok, kőzetek radioaktivitására vonatkozó rendszeres kutatásokat kezdjünk. A geológusok megegyező véleménye szerint koncentrált előfordulásokra itt alig van remény. Magyarország területén az eddig hozzáférhető felszíni vagy fúrásokkal átkutatott rétegekben komoly ércesedés seholsem ismeretes azokból a fémekből, amelyek kísérőjeként jelentkezik az Urán vagy a Thórium. Magyarországon e téren forrásvizek radiológiai átvizsgálásán kívül eddig nagyon kevés történt.

1947 tavasza óta rendszeresen folytatunk munkaközösségben kőzet-radiológiai vizsgálatokat, amelyeknek keretében a fizikai, radiológiai, mérési metodikai feladatokat a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Intézete végezte az egyik társszerző vezetésével (*Szalay Sándor*), míg a geológiai irányítást, felvételezést és kiértékelést a másik társszerző (*Földvári Aladár*) vállalta. A külszíni vizsgálatokat a Magyar Földtani Intézet támogatta, adminisztrálta, és a beszámolókat is az Intézet vette át.

A külszíni vizsgálatokhoz Geiger—Müller számlálócsöves berendezések, a laboratóriumi vizsgálatokhoz pedig ionizációs kamra és egyéb radiológiai vizsgáló berendezések készültek a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Intézetében. Hordozható Geiger—Müller számlálócsöves berendezésünk legújabb modellje kálózattól független, cca. 4 kg súlyú készülék, az összes beépített telepekkel együtt. Külső mérete nem nagyobb válltáskánál, és vállszíjon, vagy kézben könnyen hordozható. Kis hangszórón kívül elektromágneses számláló berendezéssel is fel van szerelve, amelyik másodpercenként 20 impulzust képes maximálisan regisztrálni, mintegy 1 mAmp. fogyasztás mellett. A számlálócső táplálásához szükséges cca 1000 Volt feszültséget egy külön erre a célra kidolgozott kisméretű Zamboni oszlop szolgáltatta. A számlálócső mérete 2 cm \varnothing és 10 cm hosszúságú volt, 3 mm falvastagságú erős vastokba volt helyezve. Természetes effektusa (kozmos sugárzás) a Föld felszínén percenként cca 20 impulzust tett ki. Ehhez járult még a környezet radioaktív sugárzása. A készüléket ellátó száraz telepek kapacitása többszáz üzemórára volt elegendő, a Zamboni oszlop egy-két évig volt elegendő.

Geiger—Müller számlálócsöves berendezéseket világszerte elterjedten alkalmaznak radioaktív anyagok felkutatására, azaz kvalitatív jelzésére. Minthogy a mi vizsgálataink célja kifejezetten tudományos volt, és koncentrált érc-előfordulásokra nem számíhattunk, arra törekedtünk, hogy a számlálócsővel közvetlenül a helyszínen legalább fél-quantitatív mérési eredményhez jussunk, mert kőzetmintáknak kvantitatív laboratóriumi radiológiai megvizsgálása rendkívül hosszadalmas, fáradságos és költséges feladat, amely tömegmunkában nem végezhető el. Szükséges volt a mérések elvi alapjait pontosan tisztázni és a módszert ilyen módon kvantitatívvá kiépíteni. Ezt a feladatot a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Intézetében *Szalay Sándor*

és *Csongor Éva*³ végezték el. Újabban különösen az USA-ban kiterjedten alkalmaznak furatba leereszthető ionizációs kamrákat a nyersolajkutatáshoz (»radioaktív lyukszelvényezés«). Tőlünk függetlenül, pár hónappal később *R. E. Fearon*⁴ is közölt számításokat radioaktív lyukszelvényezéssel kapcsolatban, amelyek nem számlálócsőre, hanem ionizációs kamrára vonatkoznak. A következőkben ismertetjük számlálócsöves méréseink elvi alapjait és a hitelesítés módját, úgy, ahogy azt kifejlesztettük.

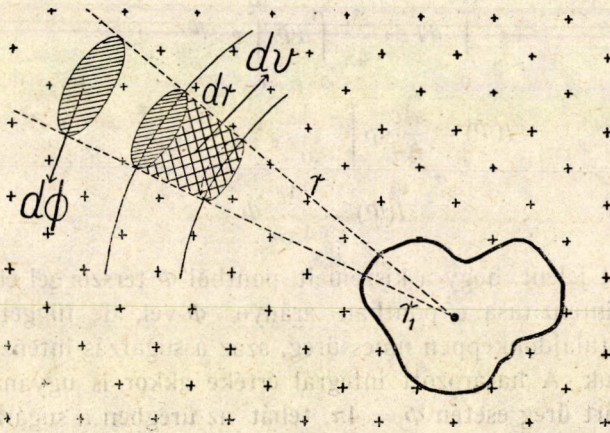
A természetben előforduló radioaktív anyagok nagyrésze vagy a Thórium, vagy az Urán radioaktív bomlási sorozat tagja. Ezek azok, amelyek számunkra érdekesek, és amelyek a természetben a legtöbb radioaktív sugárzást adják. Rádióaktív még a Kálium, Samarium, Cassiopeiium, Rubidium és Rhenium. Ez utóbbiak radioaktivitása csekély, és így jelentőségük elhanyagolható. Még jelentős Kálium-tartalommal bíró (3—4%) eruptív kőzetekben is túlnyomó részben a Thórium- és Urán-nyomoktól ered a rádióaktív sugárzás; a Kálium a sugárzásnak csak tört részét adja.

A Geiger—Müller számlálócsővel már eleve a gamma-sugárzást akartuk mérni, mert így egy nagyobb közettömegeből kaphatunk átlagértéket, amely kiközepelel a koncentráció-ingadozásokat. A Geiger—Müller számlálócső nem tesz különbséget abból a szempontból, hogy milyen radioaktív elemtől származik a gamma-sugárzás. Ennek megfelelően a mérések csak félkvantitatívva építhetők ki. Mérjük az összes gamma-sugárzást és megadjuk, hogy a kőzet rádióaktív anyagtartalma mennyi Thórium gamma ekvivalens, azaz tonnánként hány gramm Thórium adna összes bomlási termékeivel radioaktív egyensúlyban annyi gamma-sugárzást, mint a kőzetben jelenlevő összes radioaktív anyagok együttvéve.

Lássuk most a mérési módszer elvi alapjait :

Legyen először kőzetünk végtelen kiterjedésű, amelyben egyenletes koncentrációban gamma-sugárzó radioaktív anyag van eloszolva. A kőzet belsejében egy kis üreget képezünk (1. ábra), és ebbe helyezük a számlálócsövet. Az a kérdés, hogy milyen kapcsolatban lesz a számlálócső által jelzett impulzusok száma a kőzet radioaktív anyag koncentrációjával? A koncentrációt (c) fejezzük ki egyelőre gramm Thórium gamma ekvivalens/cm³ egységekben. Minthogy a kőzet végtelen kiterjedésű, az összes gamma-sugárzás, ami a kőzetben keletkezik, abszorbeálódik benne. Gyakorlatilag végtelenül rövid idő alatt sugárzási egyensúly jön létre, azaz a kőzet bármelyik dv térfogat eleme másodpercenként ugyanannyi gamma-kvantumot fog abszorbeálni, mint amennyit kibocsát. A kőzet tehát sugárzási egyensúlyban van, a kőzetet egy gamma-kvantum gáz járja át, úgyhogy annak a kőzet minden cm³-ében van egy bizonyos koncentrációja.

A kőzetbe készítsünk képzeletben egy tetszésszerű alakú üreget, és ebbe helyezük el a számlálócsövet. Az üreg belsejét is átjárják az áthaladó



1. ábra.

gamma-kvantumok. Az a kérdés, hogy mitől függ és mekkora lesz az üregben a kvantum gáz sűrűsége?

Szemeljünk ki az üregben egy tetszőszerinti pontot, és számítsuk ki az oda beérkező össz-sugárzás intenzitását. Számításunknál felhasználjuk azt a kísérletileg ismert tényt, hogy a gamma-sugárzás magában a közet anyagában abszorpciót (önabszorpció) szenved, amely jó közelítésben egy exponenciális törvénnyel állítható elő:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

μ : az abszorpciós együttható, jellege cm^{-1} az illető közet anyagában mérve.

I_0 a sugárzás eredeti, I a csökkent intenzitása x vastagságú abszorbens rétegben való áthaladás után. Intenzitáson értsük a haladás irányára merőleges felületegységen egy másodperc alatt áthaladó gamma-kvantumok számát.

Legyen dv az a kiszemelt térfogatelem, amelynek sugárzását (dI) az üreg kiszemelt pontjában észleljük; $d\Phi$ a térszög eleme, r a távolság, r_1 az üregben megtett út. A dv térfogatelemből kiinduló sugárzás intenzitása arányos a sugárzó anyag tartalmával ($A \cdot c \cdot dv$), ahol A az arányossági szorzó, c a sugárzó anyag koncentrációja. A sugárzás intenzitása r távolságban $4\pi r^2$ -el fordított arányban csökken; közben $r-r_1$ vastag közetrétegben önabszorpciót szenved. Fentiek alapján:

$$dI = \frac{A \cdot c \cdot dv}{4\pi r^2} e^{-\mu(r-r_1)} \quad \text{és} \quad dv = r^2 dr d\Phi \quad (2)$$

$$\text{tehát } dI = \frac{Ac}{4\pi} d\Phi \cdot e^{-\mu(r-r_1)} \cdot dr \quad (3)$$

$$\text{és } \int_0^{I(\Phi)} dI = \frac{Ac}{4\pi} \int_0^\Phi d\Phi \int_{r_1}^\infty e^{-\mu(r-r_1)} \frac{dr}{r^2} \quad (4)$$

$$I(\Phi) = \frac{Ac}{4\pi} \Phi \left[-\frac{1}{\mu} \cdot e^{-\mu(r-r_1)} \right]_{r_1}^\infty \quad (5)$$

$$I(\Phi) = \frac{Ac}{4\pi\mu} \Phi \quad (6)$$

Ez annyit jelent, hogy a kiszemelt pontból Φ térszöggel elhatárolt közet sugárzásának intenzitása e pontban arányos Φ -vel, de független r_1 -től. Ha $r_1 = 0$, akkor tulajdonképpen nincs üreg, azaz a sugárzás intenzitását a tömör közetben kapjuk. A határozott integrál értéke akkor is ugyanakkora, mint üreg esetén. Zárt üreg esetén $\Phi = 4\pi$, tehát az üregben a sugárzás intenzitása

$$I = \frac{Ac}{\mu} \quad (7)$$

ugyanakkora, mintha az üreg helyét is közet tölténé ki, és értéke független az üreg alakjától és nagyságától.

Itt tulajdonképpen analógia van a szilárd test hőmérsékleti sugárzásának intenzitásával termodinamikai egyensúly esetén. Az üregben ugyan emittáló források nincsenek, viszont abszorpció sincs, tehát a sugárzási egyensúly nem zavarodik meg.

Ha most az üregbe valamiféle mérőműszert teszünk, akkor az a sugárzás intenzitásával arányosan fog jelezni, és ha benne a sugárzás nem szenved nagy abszorpciót, akkor a sugárzási egyensúlyt sem zavarja meg.

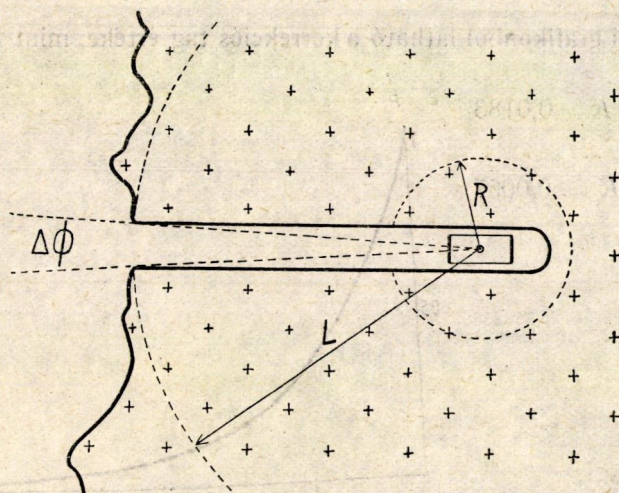
A fentieket a következő konkluziókban foglalhatjuk össze:

Ha van egy végtelen kiterjedésű, homogén fajsúlyú és homogén radioaktív tartalmú közet, akkor

1. A közetben γ -sugárzási egyensúly jön létre, azaz a sugárzás egyensúlyi intenzitása akkora, hogy a közet minden térfogat-eleme ugyanannyi γ -kvantumot bocsát ki mp-enként, mint amennyit elnyel. A közetet tehát egy a koncentrációval (c) arányos, az abszorpcióval (μ) fordítva arányos sűrűségű γ -kvantum gáz tölti be.

2. A közetben levő bármilyen alakú és nagyságú, de zárt üregben a γ -kvantum gáz sűrűsége egyensúlyban ugyanakkora, mint a közetben, azaz mintha a közet az üregben is jelen volna, ha a közet kiterjedése végtelen, vagy »elég nagy«. (Lásd később a korrekciót véges kiterjedésre.)

3. A közetben készített bármilyen alakú, de zárt üregbe helyezett és γ -sugarak mérésére alkalmas bármilyen mérőeszköz (ionizációs kamra, G.—M. számlálócső, fotografiai lemez stb.) segítségével mért adat arányos a környező közet átlagos radioaktív γ -sugárzó anyag tartalmával, és így annak mérésére felhasználható.



2. ábra.

A következőkben vizsgáljuk meg, hogy ha a kiindulási feltételek nem teljesülnek, cca milyen hibák léphetnek fel, és hogyan vehetünk igazítást. A gyakorlatban a kőzet nem végtelen kiterjedésű és az üreg nem zárt, hanem az egyik oldalán nyitott szűk furat, melybe a számlálócsövet behelyezzük (2. ábra).

Visszatérünk az (5) egyenlethez, de az r szerinti integrációt csak a kőzet véges legközelebbi határáig terjesztjük ki:

$$\text{tehát } I(\Phi, r) = \frac{cA}{4\pi} \Phi \left[-\frac{1}{\mu} e^{-\mu(r-r_1)} \right]_{r=r_1}^r, \quad (8)$$

$$I(\Phi, r) = I(\Phi, \infty) \cdot (1-K), \text{ ahol } K = e^{-\mu(r-r_1)} \quad (9)$$

a korrekciós tag, amelynek segítségével a mért eredményt ∞ kiterjedésű kőzetre akarjuk redukálni. E tag exponenciálisan eltűnik, ha $r \rightarrow \infty$

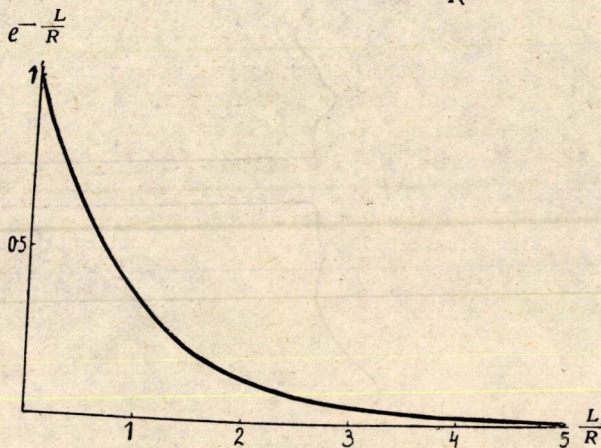
A korrekciós tag értéke $\frac{1}{e}$, ha $\mu(r-r_1) = 1$, azaz $r-r_1 = R = \frac{1}{\mu}$

Ezt a hosszúság-jellegű mennyiséget (R) ezentúl »közepes hatótávolság-nak fogjuk nevezni. Fizikai jelentése az a kőzetréteg vastagság, amelyen a kőzet saját γ -sugárzása áthatolva, annak intenzitása önabszorpció következtében $\frac{1}{e}$ -ed részére csökken. Értéke éppen az abszorpció-koefficiens reciproka. Ha a kőzettömeget L sugarú gömbhéjjal közelítőleg határoljuk, akkor $\frac{L}{R}$ viszonyból közvetlenül megkapjuk a korrekciós tagot (3. ábra).

Az alábbi grafikonból látható a korrekciós tag értéke, mint $\frac{L}{R}$ függvénye :

$$\frac{L}{R} = 4 \text{ esetén } K = 0,0183$$

$$\frac{L}{R} = 5 \text{ esetén } K = 0,0067$$



3. ábra.

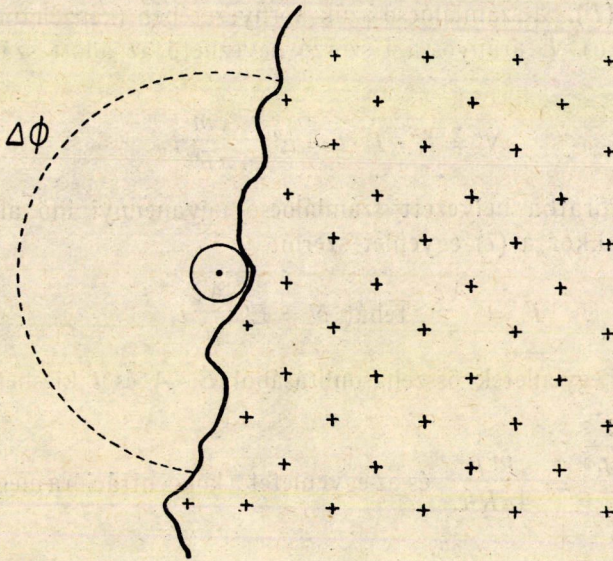
A gyakorlat szempontjából megemlítjük, hogy Uránium, Thórium és bomlástermékeik γ -sugárzása esetén μ -értéke az átlagos 2,8 fajsúlyú kőzetekben $0,1 \text{ cm}^{-1}$ körül van. 40—50 cm mély furat gyakorlatilag már végtelen mélynek tekinthető, mert a korrekció jelentéktelen.

A gyakorlatban a 2. és 4. ábrán látható geometriai konfigurációk fordulnak elő :

A 2. ábrán látható esetben, ha a kőzet határát L sugarú gömbbel közelítjük (ahol L a próbafurat mélysége), akkor túl nagy korrekciót veszünk, a hiba a valóságban kisebb, mint $e^{-\frac{L}{R}}$.

Lássuk a javítást az üreg nem zárt volta miatt. Az üreg nem zárt, tehát az integrációt Φ szerint nem lehet a teljes gömbre kiterjeszteni, mert a sugárzó anyaggal kitöltött térszög (2. és 3. ábrán) $\Delta\Phi$ -vel kisebb Φ -nél. A geometriai szemlélet és az eddigiek mutatják, hogy ha a furat mélysége többszöröse a karakterisztikus önabszorpciós méretvastagságnak, akkor a korrekció csekély, és igen jó közelítésben úgy becsülhetjük, hogy a furat nyílás-területe és a számlálócső középpontja által alkotott $\Delta\Phi$ térszöget vesszük figyelembe. A gyakorlatban cca 35 mm átmérőjű és 400 mm mély furatokat alkalmaztunk úgy, hogy a számlálócső középpontja cca 350 mm-re volt a furat szélétől. Ekkor $\Delta\Phi$ értéke cca 0,8%, tört része a 4π -nek.

A 4. ábrán látható szélsőséges esetben, amikor furat nélkül a felszínen mérünk, $\Delta\Phi$ értéke közel 2π , azaz a számlálócső csak közel fele sugárzást kap a kőzettől. Ezek szerint a korrekciós faktor értéke kb. 2 lenne. Minthogy azonban a levegő mindig tartalmaz kimutatható rádiumemanációt, annak sugárzása és a környező tárgyak sugárzása a mérések pontosságát károsan



4. ábra.

befolyásolja, ezért így csak hozzávetőleges eredményt kaphatunk, és ahol csak technikailag lehetséges, mindig furatban mérünk.

A 2. ábrán látható mérési mód alkalmazható a legjobban a gyakorlatban, és a korrekciót is pontosabban kiszámíthatjuk. Ha a kőzet síkkal van határolva, amelyre merőleges L cm hosszú furatba helyezük a számlálócsövet, akkor az integráció az exponenciális integrálhoz vezet, amelynek értékei különböző függvénytáblázatokban numerikusan megtalálhatók.

A számlálócső hitelesítése egyaránt történhet akár Thóriumra, akár Uránra. A kivitelezés módja az, hogy a számlálócsőtől jól meghatározott távolságra ismert mennyiségű Thóriumot helyezünk el, amelyik összes radioaktív bomlási termékeivel bomlási egyensúlyban van. Meghatározzuk a percenként tapasztalt impulzusok számát, és annak segítségével kiszámíthatjuk a hitelesítő konstans \dot{E} szám értékét. Az Uránra való hitelesítés üvegcsőben leforrasztott kis mennyiségű Rádiummal történhetik a fenti módon. A radioaktív gamma-sugárzás azon kemény komponensei, amelyekre a számlálócső érzékeny, a Rádium bomlástermékeitől származnak. Az Urántól a Rádiumig terjedő bomlástermékek gamma-sugárzása fentihez képest kicsi, és mint említettem, a módszer úgyis félkvantitatív, tehát exact mérési eredményekre úgysem számíthatunk.

Lássuk most a számítást. Helyezzünk el a számlálócső középpontjától R távolságban m gramm Thóriumot, amelyik összes rádióaktív bomlástermékeivel bomlási egyensúlyban van. Határozzuk meg egy bizonyos idő (t) alatt észlelt impulzusok számát (N'). Nyilvánvaló, hogy N' arányos lesz a γ -sugárzás

intenzitásával (I'), a számlálócső szűk környezetében (képzeletben F felülettel körülzárt térben). E arányossági szorzó nevezhető az adott számlálócső érzékenységének.

$$N' = E' \cdot I' \cdot t = E' \frac{A m}{4 \pi R^2} t \quad (10)$$

A kőzetbe a furatba helyezett számlálócső ugyanennyi idő alatt számoljon N impulzust, akkor a (7) egyenlet szerint

$$I' = \frac{A c}{\mu}, \text{ tehát } N = E' \frac{A c}{\mu} t \quad (11)$$

A (10) és (11) egyenletek összehasonlításából E , A és t kiesnek:

$$\frac{N'}{N} = \frac{\frac{m}{4 \pi R^2}}{\frac{c}{\mu}} = \frac{m \mu}{4 \pi R^2 c}, \text{ és az egyenletet a koncentrációra megoldva:} \quad (12)$$

$$c = \frac{N}{N'} \frac{m \mu}{4 \pi R^2} \quad (13)$$

Az egyenletben szereplő c a koncentrációt a kőzet térfogategységében, μ az abszorpció-koefficiens a kőzet anyagában jelentik. Célszerű helyettük bevezetni a koncentrációt C a kőzet tömegegységében ($C = \frac{c}{\rho}$, ahol ρ a kőzet fajsúlya), és az ú. n. tömegabszorpció koefficiensét ($\mu' = \frac{\mu}{\rho}$), amelyik adott kvantumenergiájú γ -sugárzás esetén az abszorbeáló közeg fajsúlyától jó közelítésben független számérték. Ekkor

$$C = \frac{c}{\rho} = \frac{N}{N'} \frac{m}{4 \pi R^2} \frac{\mu}{\rho} = \frac{N}{N'} \frac{m}{4 \pi R^2} \mu' \quad (14)$$

Egy adott számlálócső hitelesítését elvégezve, az egyenletben szereplő összes tényezők numerikusan kifejezhetők és egy konstansba (α) foglalhatók össze:

$$C = N \cdot \alpha \quad \text{ahol } \alpha = \frac{m \mu'}{N' 4 \pi R^2} \quad (15)$$

A kőzet rádióaktív anyag koncentrációjával arányos a meghatározott (t) idő alatt észlelt impulzusok száma. μ' értéke adott és homogén γ -sugárzást adó rádióaktív anyagra az irodalomban ismeretes.⁵ A jelen munka szempontjából számításba jövő radioaktív anyagoknál a helyzet a következő: a Thórium-sorozat γ -sugárzásának spektrális összetételét *A. Alihanov* és *G. G. Latisev*^{6, 8} kutatók vizsgálták meg. Kisebb intenzitású lágyabb komponensek mellett

túlnyomó intenzitással lép fel egy 2,6 MeV-os γ -komponens, amelynek tömegabszorpció koefficiense $\mu' = 0,039 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 1 gr Thórium bomlástermékeivel egyensúlyban cca $1,38 \times 10^3$ ilyen 2,6 MeV-os γ -kvantumot bocsát ki másodpercenként. Az Urán-rádium sorozat γ -sugárzásának spektrális összetételét A. Alihanov és V. P. Dzepelov^{7 8} vizsgálták meg. A sugárzás a legkevésbé sem monokromatikus nagy számú komponensből áll, melyek közül intenzitásban az 1,1 MeV-os cca 22%-ot, az 1,4 MeV-os cca 11%-ot, az 1,75 MeV-os 22 %-ot, az ezen felüliek együtt (1,8—2,4 MeV között) cca 20%-ot tesznek ki. Ennek megfelelően csak közelítésben lehet egyetlen (empirikusan megállapítható és használható) átlagos abszorpció koefficiensről beszélni. A gyakorlatban a $\mu' = 0,046 \text{ cm}^2/\text{gr}$ érték használatos és empirikusan jól használható is.⁹ Az intenzitás 1 gr Rádium és bomlástermékeire összesen cca $3,0 \times 10^{10}$ keményebb γ -kvantum másodpercenként. A kálium F. Behounek¹⁰ régebbi, valamint főleg E. Gleditsch és T. Graf¹¹ újabb vizsgálatai szerint grammonként és másodpercenként 3,6 γ -kvantumot bocsát ki 1,55 MeV energiával, amelynek megfelelő tömegabszorpció-koefficiens az irodalomban fellelhető⁵ grafikus összefüggés alapján $\mu' = 0,05 \text{ cm}^2/\text{gr}$ -nak adódik.

A fenti, számításba jövő radioaktív anyagoknál a lágy γ -sugár komponensek relatív erőssége jóval kisebb, továbbá a számlálócső érzékenysége is jóval kisebb ezekkel szemben. Az elkövetett hiba további csökkentésére a számlálócsövet a méréseknél 2 mm vastag ólommal ekvivalens vastagságú vastokban tartottuk. A tok fala a lágy komponenseket erősen abszorbeálja, a keményeket alig.

Mint az előadás elején említettem, a számlálócsöves mérések félkvantitatív eredményhez vezetnek, mert a számlálócső nem ad arra nézve eredményt, hogy a sugárzás hányadrésze származik Urántól, Thóriumtól, vagy Káliumtól. E kérdés megvizsgálása csak utólagos laboratóriumi vizsgálattal lehetséges. Minthogy ilyen vizsgálat nagyon fárasztó, és sok időt vesz igénybe, csak egyes esetekben, a legaktívabb kőzeteknél végezhetjük el. A vizsgálat a következő módon történik: a kőzetből vett mintát előbb acélmozsárban, azután achátmozsárban, finom porrá törve platina tégelyben, olvasztott alkáli karbonátos feltárásnak vetjük alá. Az olvadékot a kihülés után hígított sósavban feloldjuk, a kovasav-főlöslegtől többszöri tömény füstölő sósavval való bepárlással megszabadítjuk. A tiszta sósavas szűrletet, amely a Rádiumot és Thoriumot tartalmazza, felhígítjuk és mosópalackba töltjük. A mosópalack két szárát leforrasztjuk. A rádium emanáció néhány hét alatt a bennlevő Rádiummal és Urániummal bomlási egyensúlyba jön. Azután kellő óvatossággal a csúcsokat letörve, rádiumemanáció mentes tiszta légárammal a rádiumemanációt kihajtjuk a mosópalackból és bepumpáljuk egy ionizációs kamrába, ahol mennyiségileg meghatározzuk. A meghatározásból következtethetünk az Urán mennyiségére. A Thórium meghatározása hasonlóképpen történik, de az emanációk felezési idejében levő nagy különbség módot nyújt a szétválasztásra.

Ha a mosópalackban levő oldatot levegő-átbugyborékolatással alaposan átszelőztetjük, akkor a rádiumemanáció eltávozik, és minthogy felezési ideje 3,6 nap, csak lassan fog újra képződni. Ha most állandó légáramot bugyborékolatunk át a mosópalackon, és azt szárítás után folyamatosan az ionizációs kamrán át cirkuláltatjuk, akkor, minthogy a Thorium emanáció felezési ideje csak 55 másodperc, rögtön újra keletkezik, és áramlási egyensúlyban az ionizációs kamrában ionizációt hoz létre. Az ionizációs mérőműszer hitelesítése Thóriumra, ismert koncentrációjú Thórium oldaton, levegőnek ugyanolyan sebességgel való átbugyborékolatása útján történik, Rádiumra viszont hitelesített rádium törzs-oldat egyensúlyi emanáció mennyiségének meghatározása útján.

A következőkben a külszíni méréseinkről szeretnénk beszámolni. Hazánk területén két komoly mélységbeli eruptív közethegység található : ezek a Velencei-hegység és a Mecsek-hegység. Minthogy a radioaktív anyagoknak (Thórium és Urán) a mélységbeli savanyú, eruptív kőzetek (gránit) az ősforrásai, ezzel szemben a neutrális és bázikus eruptív kőzetekben (andezit stb.) előfordulásuk jelentéktelenül csekély, elsősorban e hegységek területeit vettük munkaprogramunkba.

1947 nyarán a Velencei-hegységbe szálltunk ki, ahol cca egy hónapot töltöttünk külszíni mérésekkel. E mérésekről mind a hivatalos fórumoknak, mind a Magyar Földtani Intézet évi jelentésében beszámoltunk, és az nyomtatásban is megjelent^{12 13}. Összesen cca 150 mérési pontot fektettünk, túlnyomórészt a Velencei-hegységben, mintegy 30 km² területen, részben azonban annak távolabbi környékén is, egészen a budai hegyekig, és hozzávetőleg meghatároztuk a Velencei-hegységtől távolodva az izorad (egyenlő sugárzás intenzitású helyeket összekötő) görbéket. E mérések eredményei részletezve térképeken az idézett munkákban megtalálhatók, itt csak röviden foglaljuk őket össze :

Legnagyobb radioaktivitást a savanyú eruptív kőzetek (gránit, aplit) mutattak. Úgyszólván teljesen inaktívek voltak a neutrális és bázikus eruptív kőzetek (andezit) és a hidrotermális kvarcitok. A kontakt palákban mérsékelt aktivitást találtunk. E hegység gránitjainak radioaktív anyag tartalma helyszíni, valamint utólag a Debreceni Kísérleti Fizikai Intézetben végzett laboratóriumi mérések alapján cca 40—60 gramm Thórium/tonna és cca 8—9 gramm Uranium/tonna. Számttevő feldúsulást nem észleltünk. A mérések természetesen csak a föld felszínére és a hozzáférhető exponált helyekre (köfajtók, szabadon álló sziklák és kőfalak) szorítkoztak. Bányászható ércesedés, fémesedés e hegységben nem ismeretes. Magától értetődő azonban, hogy 1 méter vastag talajréteg már teljesen visszatartja a gamma-sugárzást, és így e vizsgálatok csak a felszínről adhatnak tájékozódást. A kutatások kibővítése kutató fúrásokkal rendkívül költséges lenne, és speciális technikát igényelne, ami meghaladja az Intézet technikai lehetőségeit és így ezzel nem próbálkoztunk meg.

1949 nyarán a Mecsek-hegység és környékének savanyú eruptív előfordulásait, valamint más számításba jövő érdekesebb kőzeteit vizsgáltuk meg. A vizsgálatok mintegy 70 km² területre terjedtek ki és egy hónapig tartottak. Nagyszámú mérési pontot vettünk fel, amelyekről részletes, nyilvános közlés még nem történt. Itt csak annyit közlünk ezekből, hogy e vizsgálatok hasonló eredménnyel jártak, mint a Velencei-hegységben. A Mecsek-hegység savanyú eruptív kőzetei szintén cca ugyanolyan aktivitást mutattak, mint a Velencei-hegységé. Aktivitásuk csak néhol haladta meg cca 20 %-kal a Velencei-hegységben tapasztalt aktivitást.

A magyarországi felszínen elérhető és általunk megvizsgált gránitok aktivitása ezek szerint lényegesen nagyobb a gránitok átlagos aktivitásánál és e hazai gránitok a vizsgálatok alapján az erősebb aktivitásúak közé sorolandók be.

Ezeket a gránitokat tekinthetjük a magyarországi Urán és Thórium ősforrásainak. A felszínen levő és napjainkban a mélységben rejtőző, még fel nem tárt gránitmasszívumok anyagának elmállása útján a különböző geológiai korokban oldatba került Uranium- és Thórium-mennyiségeket az üledékes kőzetekben találhatjuk meg. Az elmállott kőzetanyag szállítása és lerakódása közben a radioaktív anyagok mennyisége feldúsulhatott és méréseink szerint helyenként valóban feldúsult, mégpedig az eredeti gránitban mért koncentrációnál nagyobb mértékben.

Miután ezzel már végeztünk a magyarországi gránitok felszíni átvizsgálásával, 1950 nyarán üledékes kőzetek átvizsgálásához kezdtünk. E kőzetek átvizsgálása a legkönnyebben szénbányákban volt lehetséges, ahol az aknák és a tárók segítségével többszáz méter vastagságban hozzáférhetők a különböző kőzetretegek, és azonkívül a fűrőberendezések is rendelkezésre állanak, úgyhogy módunkban volt a méréseket furatba helyezett számlálócsővel végezni. Találtunk egyes üledékes kőzetekben (szervesanyagtartalmú palák, szénpalák), valamint szenekben a hazai gránitokénál lényegesen nagyobb aktivitást is. Ez arra mutat, hogy a szervesanyagtartalmú üledékes rétegek keletkezése alkalmával a környező hegységek mállása révén oldatba jutott Urán- és Thóriumnyomok bizonyos kedvező körülmények között a szerves étellel, vagy a szervesanyag rothadásával kapcsolatban a vízből hosszabb időn át az üledékben feldúsulhattak. Minthogy ez üledékes kőzetek vizsgálatát 1950 nyarán kezdtük el, még túlkevés adat áll rendelkezésünkre ahhoz, hogy általános következtetést vonhassunk le arról, hogy mi várható e téren. A jövőben ez irányban kívánjuk a vizsgálatokat folytatni.

Ez a munka úgy tekintendő, mint egy alapleltár, kataszter készítése a radioaktív anyagok eloszlásáról a földkéreg Magyarországhoz tartozó részén. Az érzékeny módszer lehetővé teszi, hogy a sugárzó anyagok útját nyomon követhessük a különböző geológiai idők folyamán a magyarországi kőzetekben. Megismerhetjük a folyamatokat, melyek a vándorlás folyamán lejátszódtak, látjuk a szétszóródás és felhalmozódás tényezőit. E feladatból még csak elenyésző

csékély részt végeztünk el. Igen nagy területek és igen vastag rétegcsoportok várnak még átvizsgálásra. Ezeket a jövőben is folyamatosan és rendszeresen fogjuk végezni. Munkánk végeredménye egy természettudományos módszerekkel és természettudományos szempontból összeállított kataszter lesz, mely a radioaktív anyagok eloszlását, koncentrációját fogja feltüntetni Magyarország területén.

Még a gyakorlati vonatkoztatásokra kell kitérnünk: Kétségtelen, hogy a ma bányászott nagy koncentrációjú, de kis kiterjedésű Uranium-telepek az erős igénybevétel miatt hamar kimerülnek. Mint az összes többi bányászott nyersanyagnál, az Urániumnál is hamar elérkezik az idő, mikor a kis koncentrációjú, de nagy kiterjedésű telepek nagyipari felhasználására kerül a sor. Ekkor érkezik el annak az ideje, hogy a mi vizsgálataink szerint készült kataszter alapján kijelöljük azokat a kőzetcsoportokat, melyekből a termelés megindítható. Ekkor érkezik el az ideje annak, hogy a geokémiai ciklusnak (körfolyamatnak) kijelöljük azt a szakaszát, melyben nálunk az Uránium másodlagos feldúsulása legnagyobb mértékű volt.

A vizsgálatokból már eddig is látszik, hogy a radioaktív anyagok másodlagos felhalmozódásában a következő folyamatoknak van nagy szerepe:

1. A hegységek lepusztulásakor a kőzetek vegyi mállása folytán keletkező málladékoldatok képződésének.

2. Ez oldatok vándorlásának.

3. Alkalmos környezetben az aktív anyagok kiválásának a mállási oldatokból. Itt kétségtelenül kolloidkémiai folyamatoknak és esetleg organizmusoknak, vagy legalább is elhalt organizmusokból keletkezett organikus kolloidoknak is szerepe van az aktív anyag feldúsulásában.

Reméljük, hogy a vizsgálatok folyamán új geokémiai törvényszerűségekre fogunk bukkanni, és ezzel a tudományt azon az úton néhány lépéssel továbbvinni, melyet *Fersmann* Turkesztánban a Tuja—Mujuni radioaktív anyag előforduláson, mások a Colorádó-vidék carnotit-telepein, a skandináviai kolmpalák vizsgálatánál megindítottak.

*Debreceni Tudományegyetem
Kísérleti Fizikai Intézete.*

IRODALOM

- ¹ *Vernadsky V. I.*: Geochemie, Leipzig 1930. Orosz eredetije: *Очерки Геохимии.*
- ² *Fersmann A.*: *Geochemische Migration der Elemente*, W. Knapp, Halle (Saale) 1930.
- ³ *Szalay A. and Csongor Eve*: *Science* 109 (1949), 146—147.
- ⁴ *Fearon R. E.*: *Nucleonics* 4 (1949), 67—75.
- ⁵ *The Science and Engineering of Nuclear Power*, Vol. 1. Addison-Wesley Press Inc. Camb. 42. Mass. USA (1947), 39, 40, 43.
- ⁶ *Alichanow A. and Latyshev G.*: *Jour. Phys. U. S. S. R.* 3 (1940), 263.
- ⁷ *Alichanow A. and Dzepelov V. P.*: *Compt. rend. U. S. S. R.* 20 (1938), 133.
- ⁸ *Lásd Cork I. M.*: *Radioactivity and Nuclear Physics* d. Van Nostrand Co Inc. New-York 1950.
- ⁹ *Mme Curie P.*: *Radioactivité*, Tome 1. 303—322. Hermann et Cie, Paris 1935.
- ¹⁰ *Behounek F.*: *Z. Phys.* 69 (1941), 654.
- ¹¹ *Gleditsch E. and Graf T.*: *Phys. Rev.* 72 (1947), 640.
- ¹² *Földvári A.*: *Magyar Áll. Földtani Intézet Évi Jelentései X. kötet* (1948), 35—50.
- ¹³ *Szalay S.*: *Magy. Áll. Földtani Intézet Évi Jelentései X. kötet* (1948), 5—21.