

A termo- és optikai lumineszcens kormeghatározás elméleti alapjai és gyakorlati kérdései a negyedidőszaki kutatásokban

NOVOTHNY ÁGNES–ÚJHÁZY KOLOS¹

Magyarországon – hasonlóan a világ más országaihoz – a negyedidőszaki kutatások területén a relatív kormeghatározás mellett döntő szerepet kap az abszolút kormeghatározás is. Ennek köszönhetően a korábban, relatív módszerek segítségével rekonstruált földtörténeti, klímátörténeti események, folyamatok többé-kevésbé pontos időbeli behatárolására, valamint távoli területek relatív kronológiájának összekapcsolására nyílik lehetőség; az ilyen módon kapott eredmények azonban gyakran eltérnek a várakozástól, a korábban rendelkezésre álló ismeretek birtokában kialakított elképzelésektől, hipotézisektől. Ilyen esetben nagyon körültekintően kell eljárnia az abszolút módszer alkalmazójának, pontosan tisztában kell lennie az eljárás megbízhatóságával, az általa mért kor pontosságával, és fel kell hívnia a figyelmet az esetleges bizonytalanságokra. A megbízhatóság növelése érdekében nagyon fontos – ha lehetőség van rá – a különböző abszolút és relatív kormeghatározási módszerek párhuzamos alkalmazása, amely jó lehetőséget biztosít az eljárások hitelességének ellenőrzésére.

Nagyon lényeges tehát, hogy a negyedidőszak kronológiáját különböző módszerekkel kutató szakemberek ne zárkózzanak el mereven a más úton nyert, esetleg eltérő eredményektől, értelmezésektől, hanem a kutatások nagyobb fokú összehangolásával, a különböző szakterületek értékes információinak felhasználásával közösen tudják megoldani a felmerült problémát. Ezért lehet érdekes a termo- és optikai lumineszcencián alapuló kormeghatározási módszer alapelveinek, alkalmazhatóságának nagyon rövid, leegyszerűsített vázlata azok számára is, akik az eljárással a gyakorlatban nem foglalkoznak, hiszen a következő oldalakon leírtak ismeretében – mint a koreredmény felhasználói, értelmezői – már jobban fel tudják mérni, hogy egy-egy konkrét lumineszcens mérés esetében milyen bizonytalansági tényezők merülhetnek fel, mennyire megbízhatóak az ilyen módszerrel kapott adatok.

A termolumineszcencia mint kormeghatározási módszer az 1960-as évek elején kezdett elterjedni. Eleinte csak régészeti leletek – elsősorban égetett fazekasáru – kormeghatározására használták, amelyek esetében a mesterséges felhevítés időpontját tudták megállapítani. Később számos kutató felismerte, hogy a módszer kisebb átalakítások esetén alkalmas lehet olyan üledékek kialakulási időpontjának a meghatározására is, amelyek bár képződésükkor nem estek át felhevülésen, ám megfelelő erősségű, tartósságú napsugárzás érte őket.

Az 1960-as évek végén MOROZOV, ill. SHELKOPLYAS voltak az elsők, akik ilyen módon üledékes kőzeteken kormeghatározási vizsgálatokat végeztek. Bár hasonló próbálkozások Nyugat-Európában is folytak (BOTHNER és JOHNSON mérései mélytengeri üledéken 1969-ben), az igazi áttörésre csak 1979-ben került sor, mikor WINTLE, A. G. és HUNTLEY, D. J. megbízható, más módszerrel is igazolt TL koradatok egész sorozatát szolgáltatották ugyancsak mélytengeri üledékekből. Ettől kezdve a fejlődés szinte robbanásszerű volt, a világon rövid időn belül több, mint 30 kutatócsoport foglalkozott a termolumineszcens kormeghatározás valamely részkérdésével.

Ez a kérdéskör összetettségének, bonyolultságának tudatában nem is lehet meglepő, hiszen amint egyre többet tudunk a területről, úgy újabb és újabb problémák merülnek fel, a témával foglalkozó kutatókat folyamatos fejlesztésekre ösztönözve. Ennek eredményeképpen jutott HUNTLEY 1985-ben arra a gondolatra, hogy a *hevítés* mellett az *optikai gerjesztés* is alkalmas lehet az ásványokban tárolt lumineszcens jel aktiválására; ezzel a felismeréssel HUNTLEY gyakorlatilag megvetette az

¹ ELTE TTK Természetföldrajzi Tanszék, 1083 Budapest, Ludovika tér. 2.

optikai lumineszcens kormeghatározási módszer alapját, amely eljárás sok esetben kiküszöböli a termolumineszcencia számára megoldhatatlan problémákat.

Magyarországi lumineszcens mérések eredményei

A magyarországi löszfeltárások közül a három legismertebb és legjobban tanulmányozott feltárás (Paks, Mende, Basaharc) esetében már történtek lumineszcens vizsgálatok (*1. táblázat*). A legelső termolumineszcens kormeghatározást BORSY Z. és társai végezték el 1979-ben néhány paksi és mendei mintán. A következő termolumineszcens vizsgálatot a paksi feltárásból BUTRYM, J. és MARUSZCZAK, H. hajtott végre. Ezek a mérések már nem néhány „kiragadott” mintából történtek, hanem egy egész szelvényt teljességében vizsgáltak.

WINTLE, A. G. és PACKMAN, S. C. 1988-as termolumineszcens méréseinek célja – a paksi, mendei és tápiósülyi feltárásokból – a C^{14} -es kormeghatározási módszerrel való összehasonlítás volt. ZÖLLER, L. három méréssorozatot is végzett a magyarországi löszökön, 1987-ben Basaharcon, 1988-ban Pakson, és 1990-ben Mendén. WINTLE, A. G. és ZÖLLER, L. mérései megkérdőjelezték az addigi termolumineszcens mérések (BORSY Z.–BUTRYM, J.–MARUSZCZAK, H.) eredményeit, mert idősebbnek határozták meg ugyanazokat a rétegeket.

LU 1991–1992-ben történt termolumineszcens mérései megerősítették WINTLE, A. G. és ZÖLLER, L. eredményeit (bár kissé eltérnek azoktól). 1997-ben FRECHEN, M. és társai a termolumineszcens módszer mellett – az addig Magyarországon még nem alkalmazott – optikailag stimulált lumineszcenciás mérésekkel is elvégezték a három fő magyarországi feltárás vizsgálatát. Ezek az eredmények még idősebbnek mutatták az egyes rétegeket.

A lumineszcencia fizikai alapjai

A lumineszcens kormeghatározás alapját az a tény adja, hogy a természetben előforduló ásványok (pl. kvarc, földpátok) rácsszerkezeti hibáik, ill. az azokban felhalmozódó elektronok révén közvetve mérni tudják az őket ért ionizáló sugárzás mennyiségét. Mivel a befogadott sugárzás mennyisége arányos az idővel, meghatározásával kiszámolhatjuk, hogy a vizsgált ásványok milyen hosszú ideje vannak kitéve a természetes sugárzásnak. Ez üledékes kőzetek esetén azt az időpontot jelöli ki, amikor az ásványszemcsék utoljára fény hatásának voltak kitéve, azaz, amikor megtörtént az eltemetődésük.

Természetesen a minta korának meghatározása érdekében (a „kor” szavon ezentúl – üledékes kőzetek esetén – az eltemetődés óta eltelt időt értjük, és nem az ásvány kikristályosodásának idejét) meg kell határoznunk azt az évi sugárzás dózist is, amelynek a vizsgált ásványok eltemetődésük óta ki voltak téve. Az ionizáló sugárzás túlnyomó része magából az üledék anyagából származik, pontosabban az általa tartalmazott radioaktív bomlással, vagy bomlással rendelkező elemekből (K, U, Th), valamint kisebb részt a kozmikus sugárzásból. A módszer lényegének megértése érdekében szükséges, hogy megismerkedjünk a legalapvetőbb idevágó fizikai folyamatokkal.

Bizonyos kristályos, félvezető anyagokban a speciális molekuláris szerkezet révén két olyan öv jön létre, amelyekben az elektronok elhelyezkedhetnek. Ezek a „vegérték” és a „vezető” sávok, amelyek között az ún. „tiltott zóna” helyezkedik el, ahol normális körülmények között az anyag természeténél fogva elektron tartósan nem tartózkodhat. Azonban az anyagok nagy többsége nem rendel-

1. táblázat. Az eddig elvégzett magyarországi lumineszcens kormeghatározások eredményei (HORVÁTH E. 1999. alapján)

Talaj-réteg	Pécsi, M. 1995	Borsy, Z. et al., 1979	Butrym, J.–Maruszcak, H., 1984	Wintle, A.G.–Packman, S.C. 1988	Zöller, L. 1987	Zöller, L. 1988	Zöller, L.–Wagner, H. 1990	Lu, 1991, 1992	Pécsi, M. 1995	Frechen, M. et al., 1997
Talaj típus		TL	TL	TL	TL (Basaharc)	TL (Paks)	TL (Mende)	TL	C14, TL	TL+HRSL (Paks Basaharc, Mende)
Recens talaj	csemojzom								0–11,3	
11			19,6±2,4	15,8±1,3						
11			21,6±2,6	17,6±1,4						13–20
h1	humusz horizont			23,2±1,9				27,0±2,5	16–17 (W3)	
lősz									27–32 (W2/W3)	
h2	humusz horizont								45–60 (W2/W3)	
12			25,7±3,1	24,0±2,0						
MF1	bama erdőtalaj		28,7±3,4	20,9±1,7			44,3±1,9			
13	bama erdőtalaj			43,4±3,8						
MF2	bama erdőtalaj		33,5±4,0	74,7±6,5			69,3±5,4	73,7±5,1	85–105 (W1/W2)	
14	bama erdőtalaj		35,0±4,2	79,2±6,1	94,0±9,0	114,0±11,0				>130
BD1	bama erdőtalaj		37,8±4,2				116,0±17,0		120–140 (R2/W1)	
			39,0±4,7				144,0±14,0	144,0±12,0		
BD2	bama erdőtalaj		41,4±5,0				147,0±12,0		150–170 (R2/W1)	
			45,0±5,5		135,0±12,0	15,9±17,0	207,0±16,0	153,0±15,0		
15			53,0±6,5		163,0±18,0	172,0±18,0				
			77,0±10,0							
BA	bama erdőtalaj		81,0±10,6						195–230 (R1/R2)	
16		105,0±17,0	87,0±11,3			190,0±17,0				
MB1	bama erdőtalaj		98,0±13,0						280–310 (MR3/MR4)	
	poligonális, bama erdőtalaj-komplexum		121,0±16,0				270,0±26,0			
MB2			124,0±17,0						320–360 (MR2/MR3)	
L1		110								

kezik hibátlan kristályszerkezettel, s ezek a hibák a tiltott zónán belül félig stabil helyek, ún. „csapdák” kialakulásához vezetnek, amelyek elektronokat foghatnak be, s tarthatnak ott geológiai időtartamon keresztül.

Normális körülmények között az elektronok ezen a félvezető kristályszerkezeten belül a lehető legalacsonyabb energiával jellemezhető övben, a vegyértéksávban tartózkodnak. Amikor azonban a rendszerbe energia érkezik, pl. ionizáló sugárzás formájában, akkor elektronok válhatnak ki a vegyérték sávból, és juthatnak fel a nagyobb energiaállapottal jellemezhető vezető sávba (a), egy „lyukat” hagyva maguk mögött a vegyérték sávban (*l. ábra*). Ebből a gerjesztett állapotból az elektron visszatérhet, és újraegyesülhet a pozitív töltésű lyukkal (b), eközben kibocsátva a sugárzásból kapott energiát. A gerjesztett állapotban levő elektron és a távozása által keletkezett lyuk azonban a tiltott zónában elhelyezkedő megfelelő csapdákkal is egyesülhet (c, ill. f), és ott a csapda tulajdonságaitól függően másodperceken, vagy akár évmilliókon át fogva maradhat.

Az elektron addig marad a csapdában, amíg megfelelő mennyiségű energia nem érkezik a kiszabadulásához. Ez többféleképpen is megtörténhet: a természetes ionizáló sugárzás hatására, természetes hő-, vagy fényhatásra, valamint laboratóriumi gerjesztés révén. A csapdából távozó elektron a vezető sáv érintése után (d) újraegyesül valamelyik, csapdába esett pozitív töltéssel rendelkező lyukkal (e), miközben fény formájában energia szabadul fel. Ezt a fénykibocsátást nevezzük lumineszcenciának. Ha a csapdából az elektronokat hő hozzáadásával szakítjuk ki, akkor a bekövetkező fényjelenséget *termolumineszcenciának* nevezzük (TL), ha pedig a rendszert fény segítségével gerjesztjük, akkor *optikai lumineszcenciáról* beszélünk (OSL).

A fentiek ismeretében rendszerezve elmondhatjuk, hogy a lumineszcencián alapuló kormeghatározás nélkülözhetetlen tényezői a következők:

1. Az üledékek túlnyomó többsége tartalmaz – a kormeghatározás szempontjából kiváló tulajdonságokkal rendelkező – kvarc (SiO_2), valamint földpát ásványokat (K, Na, Ca $(\text{Al}_{1-2}\text{Si}_{2-3}\text{O}_8)$), amelyek a vizsgált kőzetet ért – természetes radioaktivitásból származó – sugárzás mérőeszközéül szolgálnak, és ezt az információt geológiai időközön át tárolják.

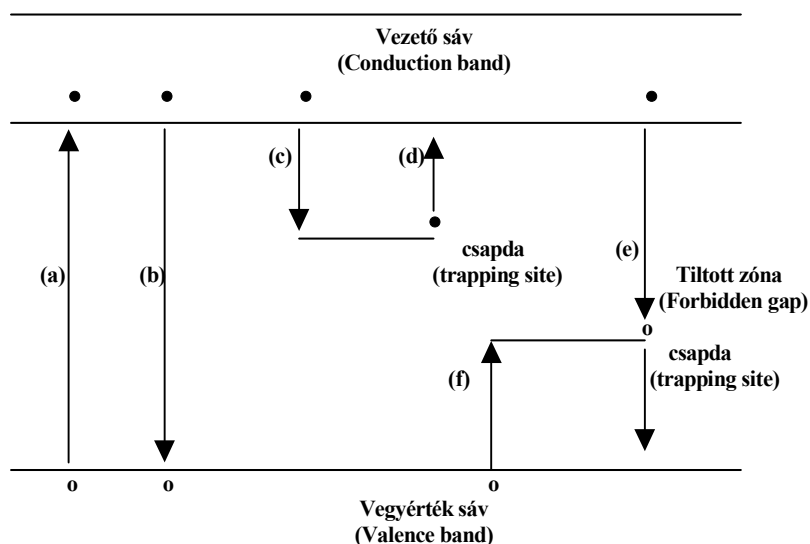
2. Radioaktív bomlással (^{40}K), ill. bomlóssal (^{238}U , ^{232}Th) rendelkező elemek megtalálhatóak valamennyi kőzetben és talajban, így a sugárzás állandó forrásaiként szolgálnak. Az időben szerencsére szintén egyenletes intenzitású kozmikus sugárzás az előbb felsorolt elemek jelentőségétől jóval elmarad, de az ionizáló sugárzás évi dózisének kalkulálásánál figyelembe kell venni.

3. Alapvető feltétel, hogy – eolikus üledékek esetén – a betemetődés előtt az ásványszemcsék megfelelő idejű, ntenzitású napsugárzásnak legyenek kitéve, annak érdekében, hogy bekövetkezzen a csapdák kiürülése, s az eltemetődéssel zérus értékről kezdődjön újra a csapdák feltöltődése. Ez az esemény az ásvány ún. „kifakulása” (bleaching), ami a gyakorlatban azonban soha sem tökéletes, a csapdában mindig marad egy bizonyos mennyiségű elektron, amely a legerősebb, s leghosszabb idejű megvilágítás esetén sem mozdítható el; ezt nevezzük a „reziduális szintnek”, amelyet minden minta esetén egyenként meg kell határozni, s a paleodózis (P) kiszámításakor figyelembe kell venni (pl. HUNTLEY, D. J. 1985).

Az ásványok kifakulása az erős napfénynek való kitettségen kívül más események hatására is bekövetkezhet.

Hevítés hatására a csapdák lenullázódása sokkal tökéletesebben megy végbe, mint az előbb említett esetben, fény következtében. Ha természetes, vagy mesterséges körülmények között az anyag hőmérséklete $500\text{ }^\circ\text{C}$ fölé emelkedik, akkor gyakorlatilag a csapdák tökéletes ürülésével számolhatunk, a zérus korú anyagunk zérus lumineszcens jellel fog rendelkezni, nem kell reziduális szintet kalkulálnunk. A kifakulásnak ez a módja a természetben sok esetben előfordul, pl. a lávafolyások, vulkáni hamu által rövid időre felhevített üledékek, valamint a becsapódott meteoritok kontaktzónájának anyaga esetében. Logikus módon ilyenkor a kormeghatározással a lávafolyás, hamuszórás, ill. a meteorit becsapódásának az idejére következtethetünk.

Termikus kifakulás játszódik le a cserépedények kiégetése során is, s ezt a régészeti kutatók ki is használják. *Elsődleges kristályosodás*, ill. *újrakristályosodás* esetén a lumineszcens szint ab initio zérus, és ebben az esetben a kormeghatározás magának az ásvány kialakulásának az idejét adja meg. Jó példa erre a barlangi travertino képződmények sikeres vizsgálata, amely WINTLE, A. G. nevéhez fűződik.



1. ábra. Kvarc- és földpátkristályok energiamodellje amely a lumineszcens jelek képződésének fizikai alapjait mutatja. Az elektronokat a teli (●), a lyukakat az üres (○) körök jelképezik. (DULLER, G.A.T. 1996. nyomán)

Simplified energy band model of a crystalline solid. Electrons are represented by solid circles, (●), while holes (○), are marked by open circles. (Adapted from DULLER, G.A.T. 1996)

A lumineszcens kor matematikai levezetése, paramétere

A kormeghatározási módszer logikáját jól szemlélteti egy nagyon leegyszerűsített hasonlat: egy pohárba meghatározott mennyiségű vizet engedünk (paleodózis) egy bizonyos vízhozamú forrásból (dózis ráta). Mi arra vagyunk kíváncsiak, hogy mennyi idő alatt érte el a vízszint a jelenlegi értéket. Ehhez a pohár által tartalmazott víz mennyiségét el kell osztani a vízhozammal. Eolikus üledékek esetén sajnos a reziduális szinttel is kell számolnunk; analógiánkban ez azt jelenti, hogy a pohárban már a feltöltés megkezdődése előtt is volt egy bizonyos mennyiségű víz; ezt meg kell határozni, és ki kell vonnunk a paleodózisból, mielőtt az osztást elvégeznénk.

A lumineszcens kor meghatározása érdekében két alapvető paramétert kell megismernünk, kiszámolnunk.

A datálendő esemény óta a mintát ért ionizáló sugárzás értékét *paleodózisnak* (P), vagy *ekvivalens dózisnak* (ED) nevezzük, és a sugárzás SI mértékegységében fejezzük ki. A paleodózisra a mintaanyag által kibocsátott lumineszcens jel mennyiségéből következtethetünk.

A mintát ért természetes sugárzás évi értékének meghatározása érdekében független méréseket kell elvégezni. Az így nyert mennyiség az *évi sugárzási dózis*, *évi dózis*, vagy *dózisráta* (D).

A fentiek ismeretében már felállíthatjuk a minta kora meghatározására a következő, nagyon leegyszerűsített egyenletet:

$$\text{Kor (1000 év)} = \frac{\text{Paleodózis /P/ (Gy)}}{\text{Dózisráta (Gy/1000 év)}} \quad (1)$$

Az összes mért lumineszcens jel (L), valamint – az egységnyi sugárdózis által kiváltott lumineszcens jel mennyiségére utaló – lumineszcens érzékenység (S) fogalmának bevezetésével az egyenletet továbbalakíthatjuk:

$$\text{Kor (1000 év)} = \frac{L}{S \cdot D} \quad (2)$$

Gyakorlatban – mint a későbbiekben látni fogjuk – a lumineszcencia helyett arra az egyenértékű laboratóriumi sugárdózisra vagyunk kíváncsiak, amely éppen az L értékének megfelelő lumineszcens intenzitást vált ki. A sugárzási dózis mérése során a sugárzást, mint az anyag egységnyi tömegeiben raktározott sugárzási energiát kezeljük, és – mint már korábban említettük – a sugárzás mértékegységében fejezzük ki (Gy), amely nem más, mint 1 J/kg tárolt energia.

Az évi sugárzási dózist (dózisráta $/D/$) nagyrészt a radioaktív elemek alfa (α), béta (β), ill. gamma (γ) sugárzása, ill. a kozmikus (c) sugárzás szolgáltatja. A fenti egyenlet (2) valójában csak akkor pontos, ha a sugárzás egyes összetevőit is feltüntetjük:

$$\text{Kor} = \frac{L}{\sum_{i=\alpha,\beta,\gamma,c} (S_i \cdot D_i)} \quad (3)$$

Különböző fizikai sajátosságok következtében az erősen ionizáló alfa részecskék a többihez képest sokkal kevésbé hatékonyan bizonyulnak az energia szállításában (ennek a jelenségnek a következményeiről később részletesebben szólunk), ezért írható fel a következő összefüggés:

$$S_\alpha \neq S_\beta = S_\gamma = S_c \quad (4)$$

Az alfa hatásfokát az a paraméterrel definiálhatjuk:

$$a = S_\alpha / S_\beta \quad (5)$$

Ezek szerint a minta korára vonatkozó egyenlet a következőképpen alakul:

$$\text{Kor} = \frac{L}{(aD_\alpha + D_\beta + D_\gamma + D_c) S_\beta} \quad (6)$$

Az alfa, béta részecskék, valamint a gamma sugárzás eltérő hatótávolsága miatt az általuk közvetített sugárzási dózisek térbeli eloszlása is meglehetősen különböző, ezért ezt a jelenséget a mérés folyamán figyelembe kell venni. Mivel az alfa részecskék hatótávolsága csak néhányszor tíz μm (szemben a béta részecskék 1–2 mm-es, valamint a gamma sugárzás ~30 cm-es hasonló értékével), hatása a durvább szemcséjű anyagok esetében igen kicsi, ill. csak a szemcsék külső, vékony rétegére korlátozódik. Ezért a lumineszcens kormeghatározásban két egymástól eltérő eljárást kellett kifejleszteni a finom-, ill. a durvaszemcsés üledékek számára (pl. SINGVHI, A. K.–MEJDAHL, V. 1984; WINTLE, A. G. 1997).

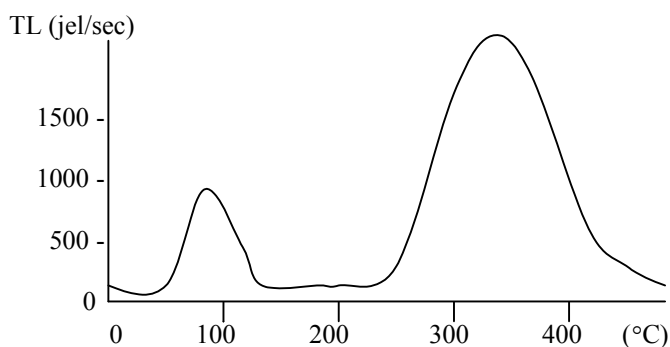
A *finomszemcsés eljárás* esetében 4–11 μm -es részecskékkel dolgozunk, amelyek nem nagyobbak, mint az alfa részecskék hatótávolsága, ezért róluk feltételezhető, hogy átjárta őket a teljes alfa dózis.

A *durvaszemcsés eljárás* során 105–180 μm átmérőjű szemcséket alkalmazunk. Mivel ezen szemcséknek csak a legkülső rétegét érte az alfa sugárzás, az anyagot ért tényleges sugárzásdózis kiszámítása túlzottan bonyolult lenne, s csak igen bizonytalan eredményt szolgáltatna. Ezért ezen módszer alkalmazása során a szemcsék külső, alfa sugárzás által szennyezett részét le kell választani, s a továbbiakban csak a béta és gamma sugárzás „látta” belső részekkel dolgozunk. A durva szemcseméret-tartomány esetén a továbbiakban lehetővé válik az egyes ásványfajták, s a velük való munka szétválasztása.

A lumineszcencia gerjesztése hevítéssel (termolumineszcencia)

A paleodózis megállapítására irányuló vizsgálatok középpontjában a lumineszcens jelek mérése áll, amely jelek közül 1985-ig kizárólag a termális úton gerjesztetteket használták fel kormeghatározásra. A folyamat során mintegy 5 mg-os mintadarabokat melegítenek fel szobahőmérsékletéről 400–700 °C közötti hőmérsékletre. A minta melegezése során lumineszcens jelek képződnek, amelyek nagyságát a hőmérséklet függvényében ábrázolják (*izzási görbe – 2. ábra*). Egyszerű esetben a görbén látható egyes csúcsok egy-egy nekik megfelelő csapdához tartoznak. Valójában a természetes anyagok esetében a helyzet sokkal összetettebb, és számos csúcs átfedi egymást.

Általában minél mélyebben helyezkedik el egy csapda a vezető sáv alatt, annál hosszabb az élettartama, s annál több energia szükséges ahhoz, hogy a csapdába esett elektronokat kiűzhessük a vezető, ill. majd a vegyérték sávba. Ebből következően általános igazság, hogy egy csúcs az izzási görbén minél magasabb hőmérsékletű, annál mélyebb csapdához tartozik. Ez a tény az alkalmazás során igen nagy fontosságot nyer, mert nem minden jelenlevő csapda stabil geológiai időtartamokon keresztül. Egy 100 °C-hoz tartozó csúcs nagy valószínűséggel gyorsan le fog bomlani már szobahőmérsékleten is, mivel a hozzátartozó csapda viszonylag sekély, és szobahőmérsékleten is elég energia áll rendelkezésre ahhoz, hogy a csapdába esett elektronok kiszabaduljanak. Ezért az ebbe a csapdába esett elektronokhoz kötődő lumineszcencia nem alkalmas geológiai kor meghatározására.



2. ábra. Egy kvarcminta izzási görbéje. A 100 °C környékén látható csúcsához tartozó csapda nem stabil, ezért kormeghatározásra csak 300 °C feletti csúcsok lumineszcens jelet szokták alkalmazni (DULLER, G.A.T. 1996 nyomán)

A TL glow curve for a sample of quartz. (Adapted from DULLER, G.A.T. 1996)

Minél magasabb hőmérsékletű a TL csúcs, annál mélyebben helyezkedik el a hozzátartozó csapda a vezető sáv alatt, és így a hozzá tartozó lumineszcencia annál valószínűbb, hogy alkalmas kormeghatározásra. A kvarc és földpát esetében a kutatók különböző hőmérsékletekhez tartozó általánosan jellemző csúcsokat állapítottak meg, amelyek kibocsátási hullámhossza is többé-kevésbé állandó.

Kvarc esetében a legfontosabb, s a TL mérések során leggyakrabban használt csúcs 325 °C-nál jelentkezik, amely 365 nm-es emissziós központtal jellemezhető (pl. KRBETSCHKE, M. R.–GÖTZE, J.–DIETRICH, A.–TRAUTMANN, T.1997). Nagy előnye az egyéb domináns kibocsátási csúcsokkal összehasonlítva, hogy napfény hatására percek alatt nagyon alacsony reziduális szintre lebomlik.

A földpát ásványcsoport lumineszcens viselkedése sokkal összetettebb, ez a hármas földpát rendszerben ($K[AlSi_3O_8]$; $Na[AlSi_3O_8]$; $Ca[AlSi_3O_8]$) jellemző kémiai és szerkezetbeli változékonyságnak köszönhető (DULLER, G. A. T. 1997). Az egyes földpát típusok keveredése, szétkülönülése, a rácsszerkezet rendje, vagy rendezetlensége, a nyomelem tartalom nagy eltérései mind bonyolítják a kutatásokat. „Tiszta” földpátmin-tát ráadásul nagyon nehéz előállítani, ha ugyan nem lehetetlen. Ennek ellenére általánosságban, s nagyon leegyszerűsítve elmondhatjuk, hogy kormeghatározásra a földpát esetében is a 300 °C-nál magasabb csúcsok alkalmasak, amelyek az ibolya-zöld közötti, ill. a 330 nm-es tartományban sugároznak.

Lumineszcencia gerjesztése fény hatására (optikai lumineszcencia)

1985-ben a vancouveri Simon Fraser Egyetemen egy kutatócsoport bebizonyította, hogy lehetséges természetben előforduló ásványokból lumineszcens jelet gerjeszteni meghatározott hullámhosszú fény hatására (HUNTLEY, D. J. et al., 1985). Kutatásaik során egy argon-ion lézer fényforrást alkalmaztak, amely 514 nm-es zöld fényt bocsátott ki magából. HUNTLEY és kutatócsoportja a folyamatot „optikai kormeghatá-

rozásnak” nevezte el. Hasonlóan eredményes kutatások folytak Oxfordban is; itt az eljárást „optikai úton gerjesztett lumineszcenciának” (OSL) nevezték el.

Ellentétben a termolumineszcenciával, ahol a lumineszcens jelet a hőmérséklet függvényében elemzik, az OSL adatokat a megvilágítási idő függvényében ábrázolják. Az OSL jel jellegzetesen csökken az idő elteltével, mivel a csapdába esett elektronok a közölt energia hatására folyamatosan mozdulnak el; az OSL jelek által kirajzolt görbét ezért „*lebomlási görbének*” nevezzük (3. ábra). Az optikai lumineszcencia a termolumineszcenciához hasonló módon használható kormeghatározásra, azonban a jelek gerjesztésében, mérésében mutatkozó különbségek miatt a két módszer bizonyos szempontból jelentősen eltér egymástól.

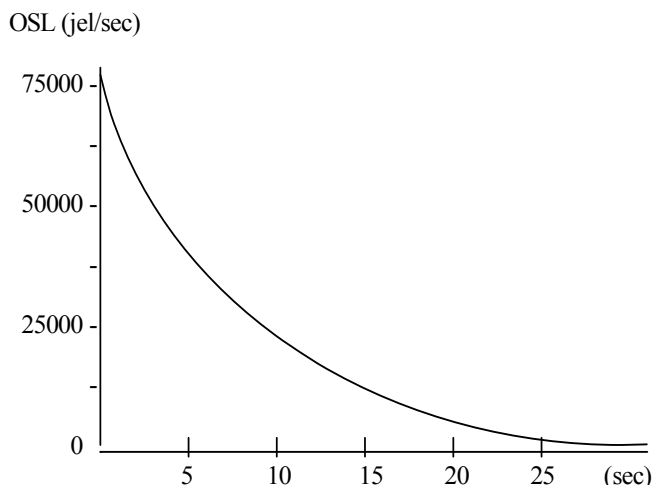
A termolumineszcencia romboló módszer, amely során a mérésekkel valamennyi jelet eltávolítjuk eredeti helyéről, ezért lehetetlen egyazon mintán ismételt méréseket elvégezni. Ezzel szemben optikai gerjesztés esetén képesek lehetünk méréseket elvégezni rendkívül rövid (0.1 s, vagy rövidebb) idejű megvilágítások alkalmazásával is, amelyek mintára való hatása elhanyagolható. Ez fantasztikus módszertani előnyökkel jár (reprodukálható, automatizálható, sokkal gyorsabb mérések).

A termolumineszcens mérések a lumineszcens jelek széles skáláját használja, beleértve a fényre érzékeny, ill. nem érzékeny jeleket is. Az OSL módszer viszont a definíciónak megfelelően csak a jel fényérzékeny részét veszi figyelembe. Ebből a különbségből ered az eljárás hatalmas előnye: míg az üledék TL szintje gyakorlatilag még hosszú napsütésnek kitett időszak után sem éri el a zérus szintet (s ez a paleodózis meghatározásában jelentős bizonytalanságot okoz), addig az OSL sokkal nagyobb hányada lebomlik a napfény hatására, ezért a módszer alkalmazásakor a reziduális szint okozta bizonytalanság sokkal kisebb fontosságú.

Másrészről viszont az OSL módszer esetén hiányzik a jel stabilitásának közvetlen ellenőrizhetősége, amelyet a TL izzási görbéje szolgáltat. E miatt szükségessé válik a minta mérés előtti előhevítese a túl rövid élettartamú csapdák kiürítése érdekében. Az előhevítés elsődleges célja tehát az, hogy az instabil, sekély csapdákhöz tartozó lumineszcens jelet kizárjuk a mérésekből. Azonban az így elmozdított elektronok egy része a kormeghatározásnál használt, mélyebb csapdába beleeshet (HUNTLEY, D. J. 1985); ezt a jelenséget nevezzük *termális transzfernek*. Mivel a termális transzfer természetes körülmények között, az eltemetődés alatt is bekövetkezhet, a minden mintarészre kiterjedő előfűtés a transzfer hatásának normalizációját hivatott szolgálni.

Mint említettük, a korai OSL mérések során egy 514 nm-es hullámhosszú fényt kibocsátó argon-ion lézert alkalmaztak. Mivel ez a berendezés meglehetősen drága, és bonyolult működtetni, egyéb speciális fényforrásokat kezdtek el kifejleszteni. Ilyenek a fénykibocsátó diódák, szabályozható lézer berendezések, és az erre a célra kialakított halogén lámpák. Ezen berendezések mintegy 400–1000 nm (ultraibolya-közeli infravörös) között bocsátanak ki fényt. A lézer fényforrások egy meghatározott hullámhosszú fényt bocsátanak ki (pl. 514 nm), míg az egyéb források (pl. filterrel ellátott lámpák) egy szélesebb hullámhosszú tartományban világítják meg a mintát (pl. 420–570 nm között a BOTTER-JENSEN és DULLER által kifejlesztett filteres lámpa).

Jelenleg leggyakrabban két hullámhossz-tartományban gerjesztik a lumineszcens jeleket: a zöld (420–570 nm), és a közeli infravörös (800–1000 nm) tartományban.



3. ábra. Egy kvarcminta OSL bomlási görbéje. – A 420–560 nm közötti hullámhossz-tartományú besugárzásra 340 nm-es lumineszcens választ detektáltak. DULLER, G.A.T. 1996 nyomán)

An OSL decay curve for a sample of quartz. (Adapted from DULLER, G.A.T. 1996)

Az előbbi esetén mind a kvarc, mind a földpát termel OSL jelet (HUNTLEY, D. J. et al. 1985), az infravörös gerjesztésre viszont csak a földpát érzékeny, a kvarc csak elhanyagolható OSL jellel válaszol. Infravörös diódákat gyakran használnak földpátok gerjesztésére, mivel olcsóak, egyszerűen használhatóak és a földpátok gerjesztési tartományának legérzékenyebb részén világítanak.

Általánosan elfogadott tény (AITKEN, M. J. 1994), hogy kvarc esetében a kiemelkedően nagy fényérzékenyséű 325 °C-os csapda a forrása az optikai úton gerjesztett lumineszcenciának. A kvarc gerjesztési hullámhossza a kezdeti kísérletek óta máig a zöld tartományban a legjellemzőbb, míg az OSL kibocsátás legnagyobb része az ultraviolet tartományba, 365 nm környékére esik.

Földpátok vizsgálatokor általában infravörös fényforrást használnak a gerjesztésre (IRSL) a zöld tartomány helyett (GLSL). Ennek egyik legfőbb oka, hogy ennél az ásványcsoportnál az IRSL jel gyorsabban kifakul, még hozzá alacsonyabb reziduális szintre, mint a GLSL jel, ezért a diódák kibocsátási tartományát 880 nm környékére szokták fókuszálni. A leggyakrabban detektált kibocsátott hullámhosszak 410 (K-földpátok) és 570 nm (Na –gazdag plagioklászok) környékén találhatóak.

A paleodózis (P) meghatározása

A *P* értékének kiszámítására – amely érték a kormeghatározás szempontjából a dózistrátaival együtt kulcsfontosságú – számos különböző módszert vezettek be (pl. DULLER, G. A. T. 1996). Valamennyi számítási módnak megvan a maga előnye és hátránya; általánosságban nem mondhatjuk, hogy valamelyik jobb, vagy rosszabb lenne. Azt, hogy adott esetben melyik használata a célravezetőbb, mindig a konkrét minta

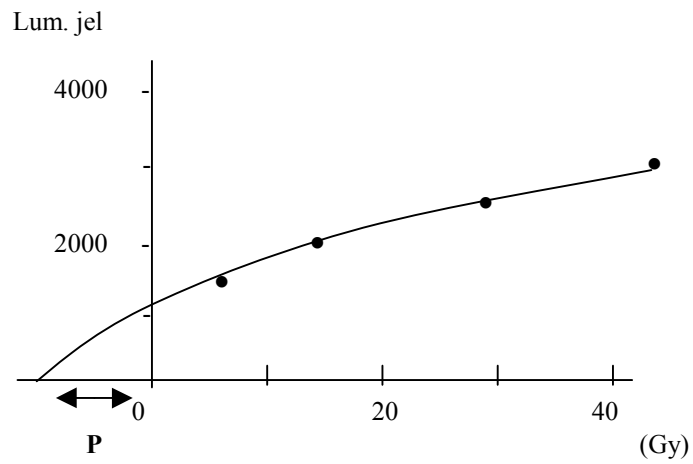
tulajdonságai döntik el (feltételezett kora, jól, vagy rosszul kifakult volta stb.). Mivel az utóbbi időben a paleodózist meghatározó módszereknek számos változata látott napvilágot, a jelen értekezésben csak a legfontosabb, általánosan használatos megközelítésekre térünk ki. Az újabban kifejlesztett módszerek legnagyobb része egy-egy speciális esetre ad megoldást, ezért talán nem követünk el hibát, ha ezeket most nem említjük.

Az „*additív dózis*” módszer (*additive dose method*, 4. ábra) talán a legegyszerűbb valamennyi közül; a minta laboratóriumi mesterséges besugárzása segítségével megpróbálja leírni a lumineszcens jel növekedését. A mintát ennek érdekében számos részre kell szétválasztani; ezt követően az egyes mintadarabok különböző nagyságú mesterséges sugárdózist kapnak (a részminták egy hányada nem kap laboratóriumi besugárzást). A különböző sugárdózisokra adott lumineszcens válaszok alapján egy, a minta által kapott dózisok, ill. a lumineszcens válaszok kapcsolatát jellemző függvényt lehet felállítani. A zérus laboratóriumi dózishoz tartozó lumineszcens jel itt következképp a természetes sugárdózist, a paleodózist jelenti. Ennek értékét a függvény zérus laboratóriumi dózison túl, zérus lumineszcens értékig való extrapolációjával kaphatjuk meg.

Üledékes minták esetében, ahol a lumineszcens jel leülepedéskor nem csökkent zérus értékre (különösen TL esetén), a függvény extrapolációját csak a reziduális szintig szabad folytatni, hiszen egyébként a minta korát túlbecsüljük. Ezzel a módosítással az eljárás tulajdonképpen megegyezik a „*teljes kifakulás*” módszerével (*total bleach method*, 5. ábra). Ez utóbbi feltételezi, hogy a leülepedéskor a kifakulás elérte a maximális szintet, tehát a csapdák elérték a fizikai jellemzőik által megengedett lehető legüresebb állapotot. Az ehhez az állapothoz tartozó lumineszcens jel mennyiségét már nem nehéz megállapítani. Ha a minta egy kis részét 1000 perc időtartamú erős mesterséges megvilágításnak tesszük ki, és utána megmérjük a lumineszcens válaszát, akkor megkapjuk a minta reziduális szintjét. Ezt ismerve már tudjuk, hogy a függvényt meddig szabad extrapolálnunk.

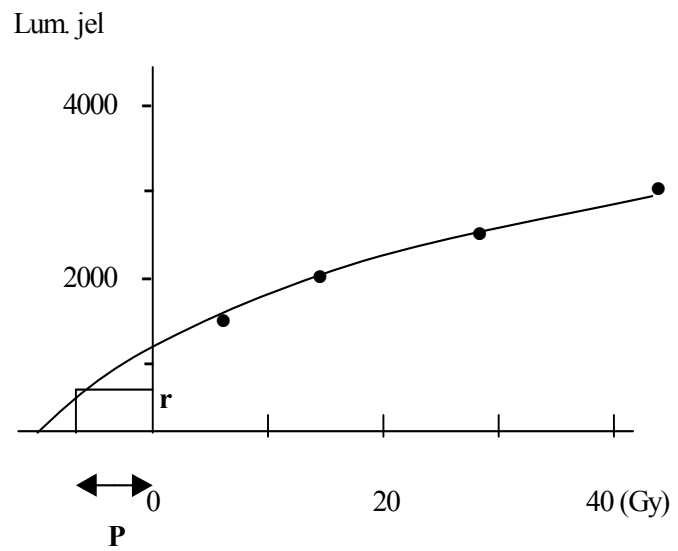
A „*regenerációs*” módszer (*regeneration method*, 6. ábra) az additív dózis módszerével szemben az extrapoláció helyett az interpolációra támaszkodik. A művelet során a részminták egy hányadát a természetes sugárdózishoz kapcsolódó lumineszcens jel értékének megméréseire használjuk fel. A többi részmintát fény hatásának tesszük ki, hogy elérjük a csapdák lehető legteljesebb kifakulását. Ezek után az egyes részmintáknak különböző nagyságú mesterséges sugárdózist adunk, és az így kapott eltérő lumineszcens értékekből megszerkesztjük a válaszgörbét. Erről a függvényről már leolvasható az a paleodózis, amely a mesterségesen be nem sugárzott részmintánk lumineszcens válaszához tartozik.

A „*részleges kifakulás*” módszere (*partial bleach method*, 7. ábra) az additív dózis módszerének egy változata. Először a fentebb leírt módon egy hozzáadott dózis görbét szerkesztünk. Egy másik – hasonló mesterséges dózisokkal kezelt – részmintasorozat a lumineszcenciás jel megmérése előtt rövid időre fény hatásának tesszük ki, annak érdekében, hogy eltávolítsuk a fényérzékeny jelkészletének egy meghatározott részét. A második, részlegesen kifakult mintasorozat alapján is szerkesztünk egy görbét; a két válaszgörbe metszéspontja kiszámolásával kapjuk meg a paleodózist.



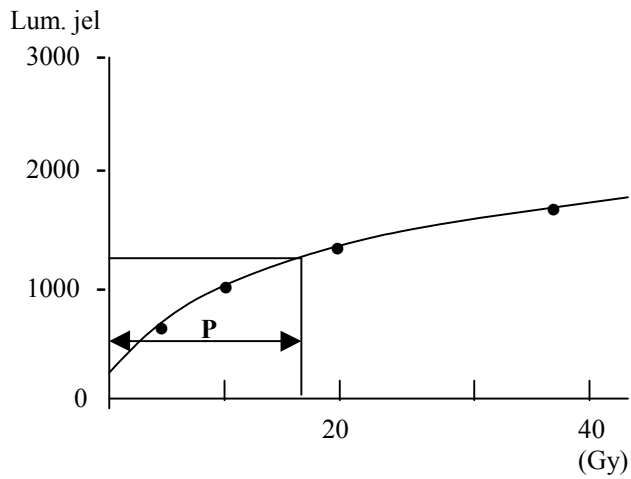
4. ábra. Az additív dózis módszere. – Gy = mesterséges sugárdózis (DULLER, G. A. T. 1996 nyomán)

The additive dose method for paleodose determination. (Adapted from DULLER, G.A.T. 1996)



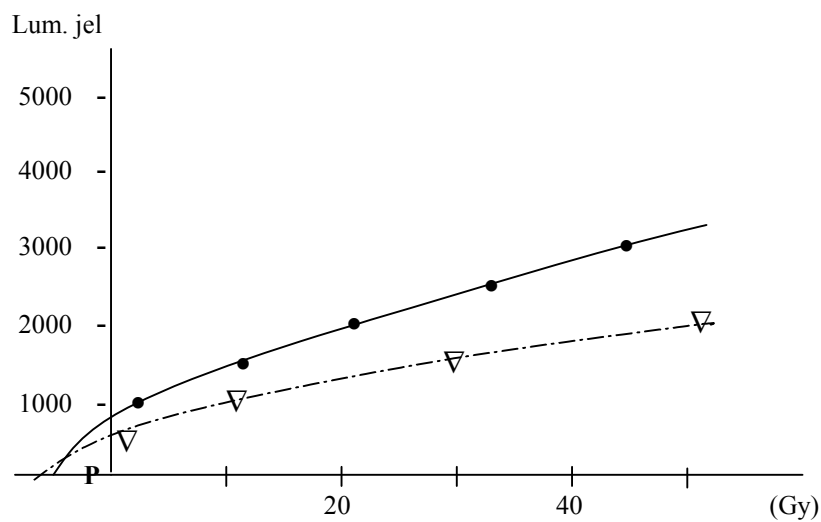
5. ábra. Az additív dózis módszere kiegészítve a teljes kifakulás módszerével. Az „r” a reziduális szintet jelöli (DULLER, G.A.T. 1996 nyomán)

The total bleach method for paleodose determination. The residual level of the luminescence signal is marked by „r”. (Adapted from DULLER, G.A.T. 1996)



6. ábra. A regenerációs módszer. – Gy = mesterséges sugárdózis (DULLER, G. A. T. 1996 nyomán)

The regeneration method for paleodose determination. (Adapted from DULLER, G. A. T. 1996)



7. ábra. A részleges kifakulás módszere. – Gy = mesterséges sugárdózis (DULLER, G. A. T. 1996 nyomán)

The partial bleach method for paleodose determination. (Adapted from DULLER, G. A. T. 1996)

A kutatók között soha nem volt széleskörű egyetértés a tekintetben, hogy melyik módszer a legcélravezetőbb.

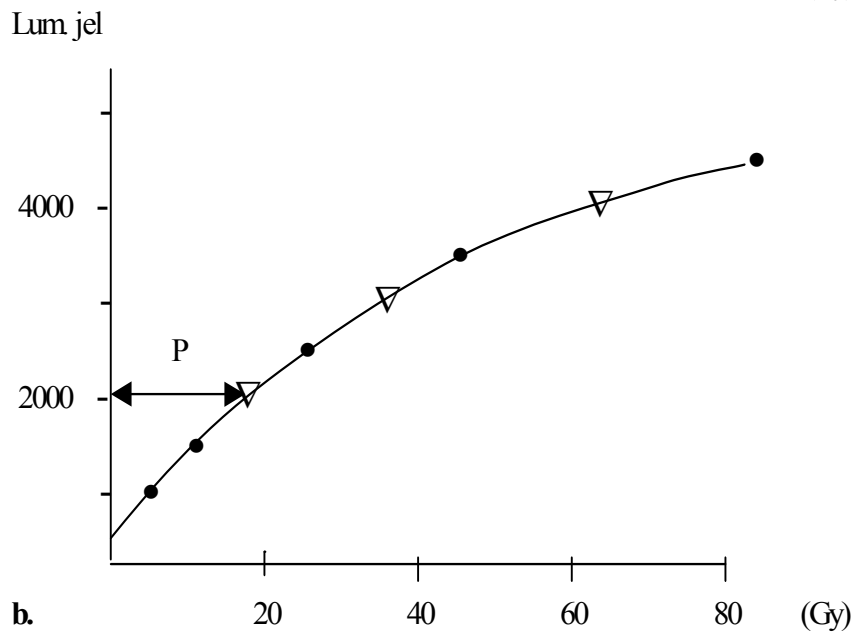
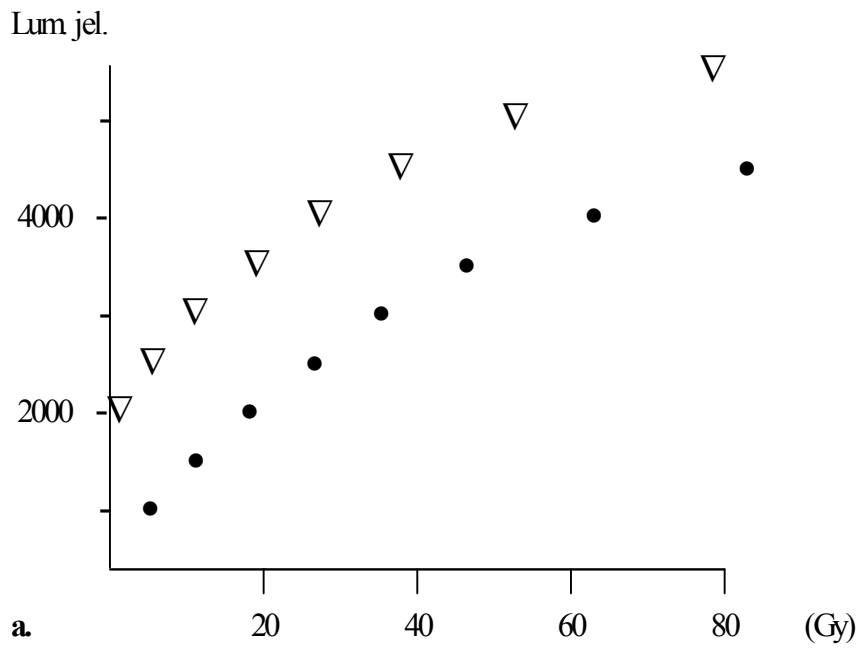
A regenerációs módszernek megvan az az előnye a másik két eljárással szemben, hogy nem kíván meg (jelentős bizonytalanságot okozó) extrapolációt az adatállományon túl. Hátrány viszont, hogy a részminták jelentős hányadának esetében fény segítségével el kell mozdítani a lumineszcens jel egészét. Számos tanulmány utal rá, hogy bizonyos körülmények között ez a fénynek való kitétel megváltoztathatja a minta lumineszcens érzékenységét, amely a paleodózis meghatározása során szisztematikus hibához vezethet.

A részleges és teljes kifakulás módszere nem foglal magában olyan lépéseket, amelyek során a minta fénynek lenne kitéve, következésképpen nem kell a lumineszcens érzékenység utólagos változásától tartanunk. Azonban, ha ezen módszerekkel olyan idős mintákat kísérünk meg datálni, amelyek közel vannak a telítési szintjükhez (amikor valamennyi csapda már majdnem megtelt; ilyenkor az egységnyi sugárzási dózishoz egyre kisebb lumineszcens válasz tartozik, tehát természetes okokból csökken az S érték, a lumineszcens érzékenység), akkor alkalmazásuk nehézkessé válik a görbe és az X tengely metszéspontja megállapításához szükséges hatalmas extrapoláció miatt.

Az említett problémákat elkerülendő fejlesztették ki az „ausztrál csúsztató módszert” (*australian slide method*, 8. ábra), amely egyesíti a regenerációs eljárást és az additív dózis módszerét. Miután mindkét módszer adatállományát ábrázoltuk a sugárzásdózis – lumineszcens válasz koordináta rendszerben, eltoljuk az „ X ” tengely mentén a hozzáadott dózis adatpontjait addig, amíg nem illeszkednek a regenerációs módszer adatai által meghatározott görbére. A paleodóziót az eltolási távolság jellemzi (ugyanis: a hozzáadott dózis módszerének mintái a természetes + a mesterséges dózist, a megfiatalítás módszerével manipulált minták pedig csak a mesterséges dózist tartalmazták; a kettő különbsége adja meg a természetes dózis nagyságát).

A módszer előnye egyrészt az, hogy nem tesz szükségessé extrapolációt, másrészt, hogy a hozzáadott módszer adatállományának bevonásával automatikusan ellenőrzi, vajon nem történt-e lumineszcens érzékenységváltozás a regenerációs módszer mintái esetében. Az ausztrál csúsztató módszer tehát ideális az idős minták elemzésére (amelyek esetén a teljes, vagy részleges kifakulás módszerének alkalmazásakor az extrapoláció rendkívül nagy lenne), amint azt 1994-ben bizonyította HUNTLEY és HUTTON, 800 000 éves dél-ausztrál dűnehomok korát megbízhatóan datálva.

Összefoglalóan elmondhatjuk, hogy az említett eljárások közül az additív dózis, ill. a regeneráció módszerét alkalmazzák rutinszerűen, a számításokat végző programok is ezen módszerekre vannak legrészletesebben kidolgozva. A többi módszert többnyire csak akkor használják, ha a minta valamely speciális tulajdonsága megköveteli azt. Természetesen ebben a tekintetben az egyes kutatócsoportok között is nagy az eltérés, hiszen vannak kutatók, akik csak a saját maguk által kidolgozott eljárásban hisznek, és az általunk elterjedtnek nevezett módszereket valamilyen megfontolásból soha nem alkalmazzák.



8. ábra. Az ausztrál csúsztató módszer. – Gy = mesterséges sugárdózis; a = megfiatalítás módszere;
 b = hozzáadott dózis módszere. (DULLER, G.A.T. 1996 nyomán)
 The Australian slide procedure for paleodose determination. (Adapted from DULLER, G.A.T. 1996)

A lumineszcens kormeghatározás időhatárai

Általános érvényű felső, vagy alsó korhatárt nem húzhatunk meg (alsó korhatáron a legfiatalabb, felső korhatáron pedig a legidősebb, kormeghatározásra alkalmas minta korát értjük), hiszen a befolyásoló tényezők rendkívül összetettek, és helyről-helyre, sőt egy feltáráson belül mintáról mintára is jelentősen különböznek. Ezért egy minta(sorozat) mérésének megkezdése előtt érdemes tájékozódni a hasonló üledékeken, vagy hasonló környezetből származó anyagokon végzett vizsgálatok eredményeiről, valamint minél többet megtudni a mérendő minta várható koráról, s a mérések időhatárait befolyásoló – a következőekben tárgyalandó – tényezőkről.

A mérések során törekednünk kell arra, hogy lehetőség szerint mind földpáton, mind kvarcon, minél több módszerrel végezzük el a kormeghatározási procedúrát. Ez egyrészt növeli a sikeres mérés esélyeit, másrészt ellenőrzési lehetőséget is nyújt. Ha lehetőség van rá (kiváltképp, ha a minta várható, vagy megállapított kora közel van a módszer időhatáraihoz), független kormeghatározási méréseket is érdemes végezni.

Felső korhatár

Kutatók – köztük BERGER, HUNTLEY, HUTTON, HUNTLEY és LIAN – a világ számos pontján állítják, hogy megbízható korokat lehet mérni mintegy 800 000 évre visszamenően (idős koradataikat a BRUNHES–MATUYAMA paleomágneses határ helyzetének vizsgálatával hitelesítették). Ezeket a nagyon ígéretes és optimista eredményeket azonban WINTLE, A. G. erősen megkérdőjelezi, a felhasznált módszerek alkalmazhatóságát is kétségbe vonva.

A felső korhatár leginkább két tényezőtől függ. Az egyik a paleodózis kiszámításához felhasznált *csapdák stabilitása*. Mint ismeretes, az ásványszemcsét ért sugárzási dózis hatására elektronok hagyják el a vegyértéksávot, és kerülnek csapdába a tiltott zónán belül. A lumineszcens kormeghatározás alapvető feltétele, hogy a kristályrácsban egyszer csapdába esett elektron a mérés pillanatáig maradjon is ott, természetes úton ne mozduljon el. A természetben előforduló ásványok rendkívül sokfajta csapdát tartalmaznak, amelyekben a töltés változó ideig marad helyhez kötött; ez az időskála másodperces és évmilliók nagyságrend között változhat. Ismert, hogy kvarc esetén az OSL jelért felelős csapda évmilliókig stabil marad. A földpátok tekintetében a helyzet sokkal összetettebb, részben az ásványcsoport kémiai összetételének sokszínűsége miatt, részben pedig azért, mert itt több csapda is alkalmas lehet kormeghatározásra, amelyek mindegyike eltérő stabilitással rendelkezik.

A felső korhatár másik meghatározó tényezője a *csapdák töltéssel való telítődése*. Ha grafikonon ábrázoljuk az elnyelt sugárzási dózis és a válaszul érkező lumineszcens jel kapcsolatát, akkor megfigyelhetjük, hogy a lumineszcens jel kezdeti növekedése lineáris, azonban később, ahogy nő az elnyelt dózis mennyisége, a lumineszcens jel növekedése lassul, s egy bizonyos ponton túl a további besugárzás ellenére már egyáltalán nem nő tovább. Ennél a pontnál mondhatjuk, hogy a minta telítetté vált.

Következésképpen egy telített minta esetében a lumineszcens kormeghatározás nem lehetséges, hiszen nem tudjuk megállapítani, hogy mekkora az őt ért paleodózis nagysága (legfeljebb minimum kort tudunk számolni). A telítődés előtt elnyelhető sugárzási dózis nagysága nagyon különböző lehet, nem csak ásványról ásványra, hanem mintáról mintára is. Általánosságban elmondható, hogy a kvarc telítődése alacsonyabb szinten történik meg, mint a földpáté, de szélsőséges kivételek is előfordulnak. Bizonyos kvarcminták lumineszcens jel növekedése egészen magas értékekig folytatódik, lehetővé téve rendkívül idős minták kormeghatározását is.

A jel stabilitása csak az ásvány fizikai, kémiai jellemzőitől függ, azonban a csapdák telítődésének időpontját logikus módon a mintát ért sugárzás *dózisrátája* is befolyásolja. Egy minta, amely pl. 500 Gy sugárzási dózis elnyelése után telítődik, 0,5 Gy/1000 év dózisiráta esetén 1 millió éven át, ezzel szemben 5 Gy/1000 éves értékénél csak 100 000 éven keresztül képes mérni az őt ért sugárzást.

Mint már említettük, a földpát általában később telítődik, mint a kvarc, s így alkalmassá válik idős minták kormeghatározására. Azonban ezt az előnyt gyakran semlegesíti a földpát káliumtartalma, amely az átlagosnál magasabb dózisirátát eredményez.

Ezt a tényt figyelembe véve kísérletezett ki HUNTLEY kutatócsoportja 1993-ban egy módszert, amely során kvarcban található földpát mikrozárványokat vizsgáltak. Az eljárásnak két nagy előnye van. Az egyik az, hogy mivel a kvarcsemcsék, s benne a zárványok igen kis méretűek (1–20 μm), a földpát káliumtartalmából adódó dózisiráta növekedés elhanyagolható; ebben a helyzetben tehát a magas telítődési szint viszonylag alacsony dózisirátával kombinálódik, s így lehetővé válik az idősebb minták kormeghatározása is. A második előnye a földpátzárvány módszernek az, hogy a földpátot körülvevő kvarc megvédi a zárványt a hosszú idő alatt előforduló esetleges geokémiai támadásoktól, amelyek – mint azt többek között PARISH is kimutatta – befolyásolhatják az érintett ásvány lumineszcens választát.

Alsó korhatár

A lumineszcens jel mérésének továbbfejlesztése (pl. OSL megjelenése), valamint a paleodózis meghatározására alkalmazott módszerek választékának bővülése nagyban hozzájárult ahhoz, hogy lehetővé vált mind fiatalabb minták kormeghatározása. A befolyásoló tényezőket – a felső korhatár esetéhez hasonlóan – itt is két csoportra oszthatjuk.

Az első korlátozó tényező a *lumineszcens jel reziduális szintje*. A minta szállítódása idején a napsugárzás a lumineszcens jelet igen alacsony szintre redukálja, ez a szint azonban (főként TL esetén) nem egyenlő nullával. Minél fiatalabb mintáról van szó, annál nagyobb bizonytalanságot okoz a reziduális szint; 1000–2000 éves minták esetén a hibaarány már 50–100% körül lehet! Optikai úton gerjesztett lumineszcencia alkalmazásával a reziduális szint sokkal alacsonyabb, s így a kalkulált korok is sokkal pontosabbak. Az utóbbi években számos szerző mért OSL alkalmazásával 1000 évnél fiatalabb korokat. Ezen kormeghatározások tárgyai minden esetben szélfúttá üledékek

voltak, amelyek fényérzékeny lumineszcens jelkészletéről feltételezhető, hogy a betemetődés előtt kifakult.

A második korlátozó tényezőt a nagyon fiatal minták *lumineszcens jelének halványosága* jelenti. A nagyon gyenge jelek detektálásának technikai nehézségei vannak; ez olyan hibaforrássá válhat, amely lehetetlenné teszi egy bizonyos kornál fiatalabb minták datálását. A földpát elnyelt sugárzási egységenként általában több lumineszcens jelet bocsát ki, mint a kvarc, ezért a legtöbb kutató földpátot használ fiatal minták kor meghatározására. A dózisérték az alsó korhatár kijelölése esetén is fontos szerepet tölt be. Egy mintában a megkívánt minimális mennyiségű lumineszcens jel nagy évi dózis esetén rövidebb idő alatt felhalmozódik, mint alacsony dózisérték mellett, tehát az első esetben nyílik lehetőség fiatalabb minták kor meghatározására.

Fiatal minták kor meghatározását tehát magas dózisértékkel jellemezhető környezetből származó földpát ásványon célszerű elvégezni.

A dózisérték befolyásoló tényezői

A lumineszcens kor meghatározás során a paleodózis mellett a *dózisérték* kiszámítása a legfontosabb feladat.

A minták anyagát érő sugárzásdózis legnagyobb részét a ^{238}U , ^{232}Th , valamint a ^{40}K radioaktív elemek bomlásából származik. Az első két elem egész bomlássorral, míg a ^{40}K csak egy lépéses bomlással rendelkezik. A kozmikus sugárzás részaránya a sugárzásdózis kialakításában általában 5% alatt marad; ez az érték akkor lehet magasabb, ha a minta anyagából teljes mértékben hiányoznak a radioaktív összetevők. Ilyen helyzet olyan homokok esetében fordulhat elő, amelyek földpát tartalmuk minimális, kvarc részarányuk megközelíti a 100%-ot. Minimális mértékben az ^{235}U és ^{87}Rb elemek is hozzájárulnak a dózisérték kialakításához, azonban – mivel részarányuk csak 0,1% nagyságrendű – koncentrációjuk meghatározására minden egyes minta vizsgálatakor nincsen szükség. Helyette – természetes körülmények között jellemző izotóparányokra vonatkozó – általános összefüggéseket (pl.: $^{235}\text{U}/\text{U} = 0,007$, $\text{K}/\text{Rb} = 0,005$ és $^{87}\text{Rb}/\text{Rb} = 0,278$) használnak fel az általuk keltett sugárzásdózis kiszámítására. Gyakran – anélkül, hogy ezzel érzékelhető eltérést okoznának a végeredményben – egyáltalán nem is veszik figyelembe őket.

A szóban forgó radioaktív elemek átlagos élettartamát tekintve (jellemzően 100 Md éves nagyságrend), a bomlásukból származó dózisérték általában 10^3 – 10^6 éves időtartományban állandónak tekinthető.

Az évi sugárzásdózis mennyisége azonban geológiai időtávlatok alatt különböző tényezők hatására kisebb-nagyobb mértékben változhat, ezzel nehezítve a lumineszcens kor meghatározás pontos végrehajtását. Ezért elengedhetetlenül fontos minden egyes feltárás, sőt kivételes esetekben minden egyes minta esetén megvizsgálni a lehetséges befolyásoló tényezőket, amelyek közül a legfontosabbak az üledékanyagban jelenlevő *radioaktivitás időbeni inhomogenitása* (radioaktív egyensúlyvesztés egyes bomlássorok izotóparányának megváltozása miatt), ill. az *üledékanyag nedvességtartalmának változása* (pl. PRESCOTT, J. R.–ROBERTSON, G. B. 1997). Ez utóbbi tényező azért különösen fontos, mert az üledékben található víz jelentősen gyengíti a rajta áthaladó sugárzást, így figyelmen kívül hagyása a minta korának alulbecsléséhez vezethet.

A lumineszcens kormeghatározás gyakorlati lépései

A mintavétel és a koreredmény kiszámítása között nagyon sok fázisa van a mérés folyamatának, amelyeket itt csak röviden tudunk megemlíteni.

A *mintavétel* során ügyelni kell arra, hogy a mintaanyag ne kapjon fényt, ez természetesen vonatkozik a szállítás, valamint a mintaelőkészítés és a mérés idejére is.

A *mintaelőkészítés* (preparáció) során vizes szitálással ki kell nyerni a mintaanyagból a megfelelő szemcsefrakciót (finomszemcsés módszer esetén 4–11 μm -es, durvaszemcsés eljárás esetén 105–180 μm -es tartomány), majd savas kezeléssel el kell távolítani a mintaanyagban található valamennyi kötőanyagot. Durvaszemcsés módszer esetén ezek után a nehézasványok leválasztása, valamint a kvarc és földpátasványok szétválasztása következik nehézfolyadék és centrifuga segítségével. Az így nyert tiszta kvarcsemcsékről erős sav segítségével le kell marni az alfa sugárzás által érintett külső réteget. A több hetet igénybe vevő preparáció a mintaanyagnak hordozófelületre, 1 cm átmérőjű alumínium korongokra vitelével fejeződik be. Egy-egy minta anyagát 80–100 korongra kell felvinni, hiszen (mint az már a korábbiakból kiderült) szükségünk van csak természetes, ill. természetes, valamint különböző mennyiségű mesterséges sugárdózist kapott mintarészekre is.

A különböző korongcsoportok *mesterséges besugárzása* a durvaszemcsék esetében általában stroncium 90-es β forrás segítségével 2–4 Gy / perc intenzitással, mintarészekről függően 5, 10, 20, 40, 80, esetleg 140 percen keresztül történik.

Finomszemcsés eljárás esetén a besugárzás forrása Co^{60} -as γ -sugárforrás. A sugárzás időtartama mintacsoportonként: 5, 7,5, 10, 15, 20, 30, 45, 88 és 121 perc, 8 Gy/perc intenzitással. Ezekből a különböző mértékben besugárzott mintacsoportokból rajzolhatjuk majd fel a *teljes kifakulás* módszerénél tárgyalt görbét (5. ábra). Ha *regenerációs* módszert alkalmazunk, akkor a mesterségesen teljesen „lenullázott” mintákat kell ezzel a γ -sugárforrással besugározni. Ebben az esetben elegendő, ha csak 5, 10 és 15 perces besugárzásokat végzünk, ebből már megszerkeszthető lesz a regenerációs módszer görbéje (6. ábra).

A laboratóriumi besugárzások körébe tartozik a minták α -besugárzása is. Ez a munkafolyamat arra szolgál, hogy az α -sugárzás hatásfokát, az a paramétert ki lehessen számítani (5. összefüggés). Ehhez Anm^{41} -es izotópot használunk. A besugárzások végeztével a mintákat néhány héten keresztül pihentetni kell, és csak két–három hét múlva kezdődhet meg a lumineszcens mérés folyamata.

A *lumineszcens jel gerjesztését és mérését* a RISO TL/OSL dán műszercsaládba tartozó TL/OSL DA-15 típusú berendezés végzi. Mint ismeretes, a lumineszcens jel gerjesztése történhet melegítéssel, vagy optikai úton, speciális hullámhosszú fény hatására. A RISO TL/OSL rendszer mindkét eljárásra képes egymás után, ugyanazon mintakorongok felhasználásával (kihasználva azt a tényt, hogy az optikai gerjesztés nem destruktív módszer, a minta lumineszcens jelkészletének csak elhanyagolhatóan kis részét mozdítja el). A műszer által elvégzendő műveleteket egy földpát mintán keresztül mutatjuk be:

1. *Előhevítés* 1 percen át, 230 °C-on. Mivel az OSL mérés esetén nem tudjuk, hogy a lumineszcens jel melyik része származik stabil, ill. instabil, gyorsan lebomló csapdákból, a biztonság kedvéért a ~250 °C alatti csapdák jelkészletét a mérés előtt szét kell rombolni. Az előhevítés során termális transzfer fordulhat elő, amely a paleodózis értékét befolyásolhatja (RHODES, E. J.–BAILEY, R. M. 1997).

2. *OSL (IRSL) megvilágítás* 25 másodpercen keresztül az infravörös tartományban (~880 nm). A földpát fénykibocsátásának detektálásához szükség van szűrőkre is, annak érdekében, hogy az emissziót felfogó, továbbító fotonokszorozó csak a földpátásvány kibocsátását érzékelje, a stimuláló fényt ne. Ezért a detektálás oldalán, a fotonokszorozó elé a SCHOTT BG 39, ill. a CORNING 7–59 típusú szűrőket kellett elhelyezni, amelyek csak a földpát által kibocsátott zöld-kék tartományt engedi át (BOTTER-JENSEN, L. 1997). A következő lépések már a termolumineszcens módszerhez kapcsolódnak.

3. *TL hevítés* 450 °C-ig 5 °C/sec sebességgel oxigénmentes nitrogénlégkörben (a melegedés során az oxigén reakciók sorát indítaná meg, amelyek befolyásolnák a mérés eredményét). A műszer detektálja a minta – melegedése során kibocsátott – lumineszcens jeleinek értékeit. Azonban az alumínium korong is melegszik, s bocsát ki jeleket, amelyeket nem lehet különválasztani a minta lumineszcens választától. Ezért van szükség az újrafűtésre.

4. *Az újrafűtés* során már csak a háttérsugárzás észlelhető, mivel az első hevítés során a minta valamennyi lumineszcens jele már elmozdult. A háttérsugárzás ilyen módon megkapott értékét a gép automatikusan levonja az első hevítés alkalmával mért értékből, s így megkapjuk a minta lumineszcens választát.

5. *A normalizációra* – a durvaszemcsés módszer esetén – azért van szükség, mert a legmondosabb minta-előkészítés ellenére sem kerül pontosan azonos mennyiségű anyag minden azonos csoportba tartozó korongra, következésképpen a mennyiségkülönbségből adódóan a lumineszcens válaszban is különbségek lesznek. Az egyes korongokon levő minták mennyiségének egymáshoz viszonyított arányát tehát meg kell határozni. Ennek érdekében a korábban is használt stroncium 90 β -forrással egy újabb, ezúttal 5 perces besugárzást hajtunk végre.

Ezt követően újra elvégezzük az előzőekben ismertetett műveleteket, az *előhevítést*, az *infravörös megvilágítást és detektálást*, valamint a *TL hevítést és detektálást*. Az így kapott értékek közötti különbség már csak kizárólag a mintaanyagok korongonkénti mennyiségkülönbségéből adódik. A normalizáció inntől kezdve már egyszerű: az egyes korongok anyagmennyiségének átlagtól való eltérését ismerve a számítógép korrigálja az OSL, ill. TL mérések egyes korongokra kapott eredményeinek értékét (pl. amelyik korongon az átlaghoz képest csak fele mennyiségű anyag van, annak az OSL és TL értékét megszorozza kettővel).

A *kvarcminták* mérése is hasonlóképpen zajlik le, azzal a különbséggel, hogy az OSL módszernél a *gerjesztő fény zöld tartományú*, ugyanis az infravörös stimulálásra a kvarc egyáltalán nem reagál. Ezt a tényt ki is használják a kvarc tisztaságvizsgálatánál: egy rövid infravörös megvilágítással ellenőrzik, nem maradt-e földpát szemcse a mintában. Ha az infravörös stimulációra válasz érkezik, akkor földpátot is tartalmaz a

minta, s ezt a továbbiakban figyelembe kell venni. A kvarc GLSL emissziója 340 nm körüli.

A *paleodózis kiszámítása* teljes mértékben számítógépes úton történik, legtöbbször R. GRÜN *TL-Data*, vagy G. A. T. DULLER *Analyse* nevű programja segítségével. A programok alapelve azonos; a RISO TL/OSL berendezés által szolgáltatott adathalmazt elemzik és rendelik hozzá az egyes mintadarabokhoz. Az adatsorok alapján felrajzolják a TL hevítési görbét, valamint az OSL bomlási görbét korongcsoportonként, vagy akár korongonként. Ez utóbbi lehetőség azért nagyon előnyös, mert így az egyes görbék elemzéséből kiderülhet, hogy melyik mintadarab viselkedett valamilyen okból a többitől nagyon eltérően, s ezért melyik korong eredményeit kell esetleg figyelmen kívül hagyni a korongcsoport átlagának számításánál. A programok figyelembe veszik a mesterségesen kifakított mintadarabok által szolgáltatott minimális reziduális lumineszcens szintet, amelyet utasításra, vagy automatikusan levonnak a mért lumineszcens értékekből. A paleodózist – ha rendelkezésre állnak a megfelelő adatok – a felhasználó által kért módon (additív dózis módszere, regenerációs módszer, stb.) számítják ki.

A *dózisráta meghatározása során* – a finomszemcsés módszer esetében – a radioaktív sugárzás mindhárom típusát és a kozmikus sugárzást is figyelembe kell venni (durvaszemcsés módszernél az α -sugárzás mérése szükségtelen). A különböző sugárzástípusok dóziszrátáját külön-külön meg kell határozni, és figyelembe kell venni az átlagos nedvességtartalom paraméterét is. A dóziszráta meghatározására alkalmas mérési módszereket két csoportba lehet sorolni:

A közvetlen eljárások segítségével rögtön a dóziszráta határozható meg (pl.: a helyszínen történt γ -dózis mérés),

A közvetett eljárások során a radioaktív elemek koncentrációjának méréséből számításokkal, vagy megfelelő táblázatok felhasználásával kapható meg a dóziszráta (pl. BOTTER-JENSEN, L.–MEJDAHL, V. 1985).

Azt, hogy mely módszer, vagy módszerek alkalmazása a legcélszerűbb, a minta típusa és jellemzői szabják meg. Eolikus szállítású sivatagi homok esetén – ahol a víz nincs hatással a radioaktív egyensúlyra – a dóziszrátát kielégítő pontossággal meg lehet határozni laboratóriumi vizsgálatokkal. Fluviális üledékek esetén azonban – a dóziszráta víz általi befolyásoltsága miatt – szükség van a terepen elvégzett hosszú távú mérésekre (SINGHVI, A. K.–KRBETSCHKEK, M. R. 1996).

A leggyakrabban használt módszerek:

Legelterjedtebb a γ -spektrométer alkalmazása, amellyel a radioaktív sugárzás mindhárom összetevője megadható

A többi módszerrel az egyes összetevők csak külön-külön határozhatók meg (pl.: α -aktivitás: α -számláló, neutronaktiváció, β -aktivitás: β -számláló, TL dozimetria, kémiai elemzés /a K koncentráció meghatározására/, γ -aktivitás: hordozható szcintillációs számláló, TL dozimetria).

A *kozmos sugárzás* hozzájárulásának pontos megállapításához a kozmikus sugárzás mérésén kívül számos tényezőt figyelembe kellene venni, azonban ezek csak olyan kismértékű eltérést jelentenének, hogy nyugodtan elhanyagolhatók. Számításánál a gyakorlatban csak azt a tényt vesszük figyelembe, hogy a kozmikus sugárzás dózistel-

jesítménye a talajszinten 0,3 mGy/év, ami 0,6 m-es mélységtől kezdődően 0,15 mGy/év szinten állandósul. Tehát az a legegyszerűbb, de annak ellenére pontos eljárás, ha a többi tényezőtől kiszámított dózisirátához egy 0,15 mGy/év-es értéket adunk hozzá.

A paleodózis kiszámítása után a független úton kiszámított évi dózisirata betáplálásával kaphatjuk meg számításaink végeredményét, a vizsgált minta lumineszcens korát.

IRODALOM

- AITKEN, M. J. 1994. Optical dating: a non-specialist review. – *Quaternary Geochronology*, 13, pp. 503–508.
- ABOTTER-JENSEN, L. 1997. Luminescence techniques: instrumentation and methods. – *Radiation measurements*, 27, 5/6, pp. 749–768.
- ABOTTER-JENSEN, L.–MEJDAHL, V. 1985. Determination of potassium in feldspars by beta counting using a GM multicounter system. – *Nucl. Tracks*, 10, pp. 663–666.
- DULLER, G. A. T. 1996. Recent developments in luminescence dating of Quaternary sediments. – *Progress in Physical Geography* 20, 2 pp. 127–145.
- DULLER, G. A. T. 1997. Behavioural studies of stimulated luminescence from feldspars. – *Radiation Measurements* 27, 5/6, pp. 663–694.
- HORVÁTH, E. 1999. Loessfest'99. – Abstract volume pp. 110–112.
- HUNTLEY, D. J. 1985. On the Zeroing of the Thermoluminescence of Sediments. – *Physics and Chemistry of Minerals* 12, pp. 122–127.
- KRBETSCHEK, M. R.–GÖTZE, J.–DIETRICH, A.–TRAUTMANN, T. 1997. Spectral information from minerals relevant for luminescence dating – *Radiation Measurements*. 27, 5/6 pp. 695–748.
- PRESCOTT, J. R.–ROBERTSON, G. B. 1997. Sediment dating by luminescence: a review – *Radiation Measurements*. 27, 5/6, pp. 893–922.
- RHODES, E. J.–BAILEY, R. M. 1997. The effect of thermal transfer on the zeroing of the luminescence of quartz from recent glaciofluvial sediments – *Quaternary Science Reviews*, 16, pp. 291–298.
- SINGHVI, A. K.–KRBETSCHEK, M. R. 1996. Luminescence dating: A review and a Perspective for Arid Zone Sediments. – *Annals of Arid Zones*. 35, 3 pp. 249–279.
- SINGHVI, A. K.–MEJDAHL, V. 1984. Thermoluminescence dating of sediments – Preprint
- WINTLE, A. G. 1997. Luminescence Dating: laboratory procedures and protocols – *Radiation Measurements*. 27, 5/6, pp. 769–817.

THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF THE THERMO- AND OPTICAL LUMINESCENCE IN THE QUATERNARY RESEARCH

by *Á. Novothny* and *K. Újházy*

S u m m a r y

In our days the “absolute” dating methods have increasing importance in the Quaternary Research. By these – often highly sophisticated – procedures we are able to determine the exact time of some important geomorphologic events occurred during the Pleistocene and the Holocene. Nevertheless the simultaneous use of the relative methods remains indispensable in order to ensure the detached control of the modern procedures and to obtain the possible most reliable age-results. This trend requires such experts who are in possession of the basic knowledge of the most common dating procedures, therefore we consider extremely useful the presentation of the physical basis of the luminescence, one of the most developing dating methods.

The fundamental concept of the thermal and optical luminescence is to use naturally occurring minerals as dosimeters, which record their exposure to ionizing radiation from the environment. The quantity of the absorbed radiation is known as paleodose (P) and is expressed in SI units of grays (Gy). Together with measurements of the rate at which samples are exposed to radiation (Dose rate), this information – using the following equation – can be used to estimate the age of the sample.

$$\text{Age (ka)} = \frac{\text{Paleodose P (Gy)}}{\text{Dose rate (Gy/ka)}}$$

The luminescence signal that is used to measure the paleodose of Quaternary sediments is sensitive to light. Therefore it is an implicit assumption that the constituent mineral grains were exposed to daylight when they were being transported and that this exposure removed any luminescence signal they may have already had. Thus when the grains are first deposited they have a minimal luminescence signal and their paleodose is zero, or close to zero. It is this exposure to light that is the event that is being dated.

Translated by the authors

Enyedi György 70 éves

A 2000. augusztus 25-én 70. születésnapjához érkezett ENYEDI György rendkívül sikeres, sokoldalú tudományos, oktatói, tudományos-vezetői, szakszerkesztői tevékenységet tudhat maga mögött, aminek még koránt sincs vége. Hazai és nemzetközi ismertsége és elismertsége méltán kiemelkedő, amit rangos tisztségek, vezetői szerepkörök, kitüntetések, akadémiai és tudományos egyesületi-társulati tagságok alig számba vehető hosszú sora, színvonalas és több százra tehető publikációinak listája, tanítványainak serege tanúsít.

Maga is egy sajátos szakmai irányultságú-összetételű iskola jeles tagja, amely a negyvenes-ötvenes évek fordulóján MARKOS György professzor irányításával a Közgazdaságtudományi Egyetemen olyan geográfusok hadát adta a terület- és településfejlesztés, a gazdaság- és tudományirányítás, a felsőoktatás, a tudományos kutatás számára, ami közvetlenül és közvetve máig meghatározó. A geográfusi és közgazdász, részben szociológusi, sőt más szakterületeket is magába ötvöző komplex szemlélet a regionális tudomány megalapozásához, kifejlesztéséhez, műveléséhez és eredményeinek alkalmazásához.