

Késő-negyvedidőszaki üledékek betemetődési korának meghatározása kvarcsemcsék lumineszcens (OSL) vizsgálatával

THAMÓNÉ BOZSÓ Edit¹, NAGY Attila²

¹ Magyar Állami Földtani Intézet, Földtani Kutatás Osztály, H-1143, Budapest, Stefánia u. 14. bozso@mafi.hu

² Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, Radiometriai Laboratórium, H-1118, Budapest, Homonna u. 9., nagy@elgi.hu

OSL dating on the quartz of Late Quaternary sediments

Abstract

This paper introduces the optical luminescence dating method: SAR-OSL (Single Aliquot Regenerative Dose Optically Stimulated Luminescence) of sand-sized quartz grains. This is the method used by the Geological Institute of Hungary. It gives the age of burial of sediments (mainly sands, and silt or loess), and pays strict attention to their last exposure to sunlight, up to about 100 ka.

OSL age-dating focuses on that luminescence which occurs during stimulation of the minerals by light when their absorbed and stored energy from radioactive radiation is released. Therefore this method needs special sampling and sample preparation to enclose light exposure. Based on the measurement of the natural luminescence signal of the quartz grains, and then the response of these luminescence signals to different artificial radioactive doses given under laboratory conditions, it is possible to calculate the dose (equivalent dose) which was absorbed by the sediment from the time of its burial. The equivalent dose, divided by the dose which is absorbed by the covered sediment in a time unit (dose rate), gives the OSL age. For luminescence measurement and irradiation the Geological Institute of Hungary uses a RISØ TL/OSL DA-15C/D reader to determine the equivalent doses. Dose rate calculation, based on high resolution gamma-spectrometry measurements of sediments around the OSL samples, were carried out in the Eötvös Loránd eophysical Institute.

Keywords: luminescence dating, SAR-OSL, quartz, Late Pleistocene – Holocene, sediments

Összefoglalás

A bemutatásra kerülő és a Magyar Állami Földtani Intézetben is alkalmazott lumineszcens kormeghatározási módszer a homok méretű kvarcsemcsék ún. SAR-OSL (Single Aliquot Regenerative Dose Optically Stimulated Luminescence) vizsgálatán alapul. Ezzel a módszerrel elsősorban a 100 ezer évesnél fiatalabb üledékes kőzetek, főként homokok, valamint kőzetliszt-, illetve löszminták betemetődési kora határozható meg, pontosabban az, hogy mikor érte utoljára napfény ezeket az üledékeket.

Az OSL kormeghatározás azt a lumineszcenciát használja fel, amely az ásványokban az őket ért radioaktív sugárzásból elnyelt és tárolt energia felszabadulásakor jelentkezik fényel történő gerjesztés hatására. Ezért a módszer speciális, fénytől védett mintavételt és minta-előkészítést igényel. A kvarcsemcsék természetes lumineszcenciájának mérése, majd azok különböző dózisu laboratóriumi mesterséges radioaktív besugárzása, és a besugárzások nyomán kialakult lumineszcencia mérése alapján kiszámítható az üledék által a betemetődés időtartama alatt elnyelt radioaktív sugárzás dózisa (egyenérték dózis). Az egyenérték dózis és a betemetett üledék által időegység alatt elnyelt radioaktív sugárzás (dózisráta) hányadosa adja meg az OSL kort. Az egyenérték dózis meghatározásához szükséges lumineszcens mérések és besugárzások a MÁFI-ban RISØ TL/OSL DA-15C/D típusú berendezéssel történnek. A dózisráta meghatározásához az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet munkatársai végeznek nagyfelbontású gamma-spektrometriai méréseket az OSL minták körüli üledékanyagokon.

Tárgyszavak: lumineszcens kormeghatározás, OSL, kvarc, késő-pleisztocén–holocén, üledékek

Bevezetés

A lumineszcencia gyenge fénykibocsátás, amely gerjesztés hatására jelentkező fény, ún. hideg fény, ami nem azonos a magas hőmérsékleten, izzáskor jelentkező fényvel. Ez a fénykibocsátás a gerjesztés után azonnal, a másodperc 100 milliommód része alatt jelentkezik. A lumineszcencia fénykibocsátást gerjesztheti kémiai reakció (élő szervezetekben is), elektromos áram, illetve elektronnaláb, fény, radioaktív sugárzás, hevítés, mechanikai hatás (dörzsölés, törés, nyomás), sőt kristályosodás, és folyadékokban a hanghatás is. A gerjesztéstől függően a lumineszcencia több fajtája különböztethető meg: kemo-, bio-, elektro-, katód-, foto-, optikai-, radio-, termo-, tribo- stb. lumineszcencia. A lumineszcencia fény gyors lecsengése esetében fluoreszkálásról, a gerjesztés megszűnése után is folytatódó, lassan lecsengő fénykibocsátáskor foszforeszkálásról beszélünk.

Egyes ásványok lumineszcenciáját már több mint kétezer éve megfigyelték. ARISZTOTELÉSZ, majd PLINIUSZ is említést tett lumineszkáló rubinokról (AITKEN 1985). A 17. század legelején az olasz alkímista Vincenzo CASCARIOLA a barit égése során látható titokzatos vörös fényről számolt be (AITKEN 1985, GOROBETS & ROGOJINE 2002). Lumineszcencia jelenséget írt le az angol Robert BOYLE is 1663-ban, amikor a gyémánt enyhe melegítéskor sötétben látható fényfelvillanást tapasztalt (AITKEN 1985). George STOKES 1852-ben a fluorit UV fényvel történő megvilágításakor jelentkező kék fénykibocsátást fluoreszcenciának nevezte el (GOROBETS & ROGOJINE 2002). Később észrevették, hogy a kibocsátott fény színe az egyes ásványokra, illetve azok szennyeződésére jellemző, amit azóta is felhasználnak bizonyos ásványok kutatása és azonosítása során. A lumineszcencia fény detektálását az 1940-es évektől a fotoelektron-sokszorozó (PM cső) tette lehetővé. Az 1950-es évek elején az amerikai DANIELS és társai a lumineszcencia fény mérése alapján az anyagot ért radioaktív sugárzás nagyságát is meghatározták (AITKEN 1985, GOROBETS & ROGOJINE 2002).

Az 1960-as években Oxfordban elsősorban ZIMMERMAN és AITKEN fejlesztették ki a termolumineszcencia (TL) kormeghatározási módszert, mellyel a hevítés hatására létrejött fénykibocsátást mérték, és annak alapján égetett kerámia régészeti leletek kiégetési időpontját határozták meg (AITKEN et al. 1964, 1968). A nyolcvanas évek közepe táján már több mint 40 régészeti és geológiai laboratóriumban végeztek ilyen kormeghatározást (AITKEN 1985). Később a termolumineszcencia kormeghatározást megégett kövekre is alkalmazták, sőt ez a módszer alkalmasnak bizonyult az üledékek betemetődési időpontjának meghatározására is, mivel a megfelelő erősségű és tartósságú napfény a kiégetéshez hasonlóan lenullázza az ásványok „lumineszcencia óráját” (pl. SHELKOPLYAS & MOZOROV 1965, WINTLE & HUNTLEY 1979). A lumineszcencia korok helyességét más módszerekkel megállapított koradatokkal is sikerült igazolni (pl. WINTLE & HUNTLEY 1979).

Az 1980-as évek közepén a kanadai Simon Fraser Egyetem fizikusai, HUNTLEY és munkatársai felismerték, hogy az ásványokban tárolt lumineszcencia jel fényvel történő

gerjesztés hatására is aktiválható (optically stimulated luminescence: OSL), ami kormeghatározásra is alkalmas. A szükséges méréseket a TL műszer továbbfejlesztett változatán végezték (HUNTLEY 1985, HUNTLEY et al. 1985). A módszert hamarosan Oxfordban AITKEN és munkatársai is alkalmazni kezdték, és 1998-ban már egy tucat OSL laboratórium működött világszerte (AITKEN 1998). A gerjesztéshez eleinte gáz (pl. argonion) lézert használtak, majd olcsóbb kvarc-halogén, vagy xenon ívlámpákat, később pedig fénykibocsátó diódákat (LED-eket). Kezdetben csak egy mintatartót tartalmazott a műszer, és a szükséges radioaktív besugárzást másutt végezték. Később olyan automatikusan működő műszereket fejlesztettek, amelyekbe akár 48, vagy 64 db mintatartó is berakható, és amelyek radioaktív sugárforrást, illetve röntgensugár generátort is tartalmaznak (pl. BØTTER-JENSEN et al. 2000, POOLTON et al. 2001). Olyan speciális mintatartó is készült, amely segítségével 100 db ásványszemcse TL, OSL, vagy radiolumineszcenciája egyenként mérhető (DULLER et al. 1999, BØTTER-JENSEN et al. 2003a).

A lumineszcencia gerjesztéséhez sokáig csak állandó intenzitású megvilágítást (CW-OSL: continuous wave OSL) használtak, később lineárisan növekvő erősségű megvilágítást (LM-OSL: linear-modulated OSL) is alkalmazni kezdték (BØTTER-JENSEN et al. 1999), ami megkönnyíti a különböző lumineszcencia komponensek tanulmányozását és elkülönítését. Az OSL-jel természetes és mesterséges képződésének kinetikáját ma már számítógépes szimulációs modellek segítségével is vizsgálják (pl. BAILEY 2001).

Olyan lumineszcencia mérőberendezéseket is kifejlesztettek, hordozható változatban is, amelyekkel fűrómagok mentén (DULLER et al. 1992, POOLTON et al. 1996), vagy kis mintaanyagokon (LI & WINTLE 1994) gyors lumineszcencia mérések végezhetők. Ezek pontos koradatot ugyan nem szolgáltatnak, de információt nyújtanak a lumineszcencia szignál szelvénymenti változásairól, ami segíti a rétegtani hiányok és az áthalmazódás felismerését, valamint a pontos OSL kormeghatározásra legmegfelelőbb minták kiválasztását. A lumineszcencia kormeghatározáshoz hasonló fizikai alapokon fejlődött ki az elektron spin rezonancia kormeghatározási módszer (ESR, pl. SCHWARCZ et al. 1988, GRÜN & STRINGER 1991).

A lumineszcencia kormeghatározással numerikus koradatok nyerhetők, amelyek az üledékekben gyakori kvarc és földpát a legalkalmasabb, de a cirkon, a vulkáni üveg, és a karbonátok korolására is vannak példák (AITKEN 1985, 1998). Az üledékek lumineszcencia kora megadja, hogy az ásványszemcséket mikor érte utoljára olyan fény vagy hőhatás, amely a lumineszcencia szignáljukat lenullázza. Fényhatás esetében a lumineszcencia kor az üledék betemetődése óta eltelt időtartamot adja meg. Erre a célra az OSL kormeghatározás megfelelőbbnek bizonyult, mint a TL kormeghatározás. E módszerek elméleti és gyakorlati alapjait elsősorban AITKEN (1985, 1998) és BØTTER-JENSEN et al. (2003b) könyvei tartalmazzák. Az újabb elméleti kutatások, fejlesztések, és gyakorlati alkalmazások szakfolyóiratokban (pl. Ancient TL, Radiation Measurements,

Radiation Protection Dosimetry, Quaternary Geochronology, Geochronometria, Quaternary Science Reviews stb.) és konferenciákon, elsősorban a rendszeresen megrendezésre kerülő LED (Luminescence and Electron Spin Resonance Dating) konferenciákon kerülnek bemutatásra.

Magyarországon először BORSY et al. (1979) végeztek TL kormeghatározást paksi és mendei löszmintákon a Központi Fizikai Kutató Intézet TLD-04 műszerével. Egy ideig az MTA Izotópkutató Intézetében is folyt termolumineszcens kormeghatározás régészeti leleteken Harshaw 2000 mérőműszer segítségével (pl. BENKŐ et al. 1989). Külföldi laboratóriumokban számos TL, majd OSL koradat született PÉCSI Márton, GÁBRIS Gyula és HORVÁTH Erzsébet kezdeményezésére magyarországi löszökön (pl. BUTRYM & MARUSZCZAK 1984, WINTLE & PACKMAN 1988, ZÖLLER et al. 1994, ZÖLLER & WAGNER 1990, PÉCSI et al. 1995, FRECHEN et al. 1997, NOVOTHNY et al. 2002, 2009, 2010), és futóhomok előfordulások anyagán (UJHÁZY 2002, UJHÁZY et al. 2003). Magyar nyelven is olvasható AITKEN (1982) egyik kézikönyve BENKŐ Lázár fordításában, amely a termolumineszcens kormeghatározást és annak régészeti alkalmazását is bemutatja. A lumineszcens kormeghatározás elméleti alapjait, módszereit és gyakorlati kérdéseit magyarul NOVOTHNY & UJHÁZY (2000) publikációja ismerteti. Néhány éve a Magyar Állami Földtani Intézetben és a Szegedi Tudományegyetemen is folyik lumineszcens kormeghatározás dán gyártmányú RISØ TL/OSL mérőberendezés segítségével, ezért számos új OSL koradat született (pl. THAMÓ-BOZSÓ et al. 2007a–b, NYÁRI et al. 2007, SIPOS et al. 2009).

A Magyar Állami Földtani Intézetben (MÁFI) üledékes kőzetek kvarcsemcséinek OSL kormeghatározását véghezvük a jelenleg legelfogadottabb SAR eljárás (Single Aliquot Regenerative Dose protocol) szerinti lumineszcens mérésekkel. Ezzel a módszerrel elsősorban a 100 ezer évesnél fiatalabb üledékes kőzetek betemetődésének kora határozható meg, ami tágabb időintervallum, mint például a ^{14}C -módszer (max. 60 ezer év) vagy ^{210}Pb -módszer (max. néhány száz év) esetében.

A továbbiakban, a MÁFI-ban alkalmazott módszer kerül részletesebb bemutatásra. Mivel a lumineszcens kormeghatározás

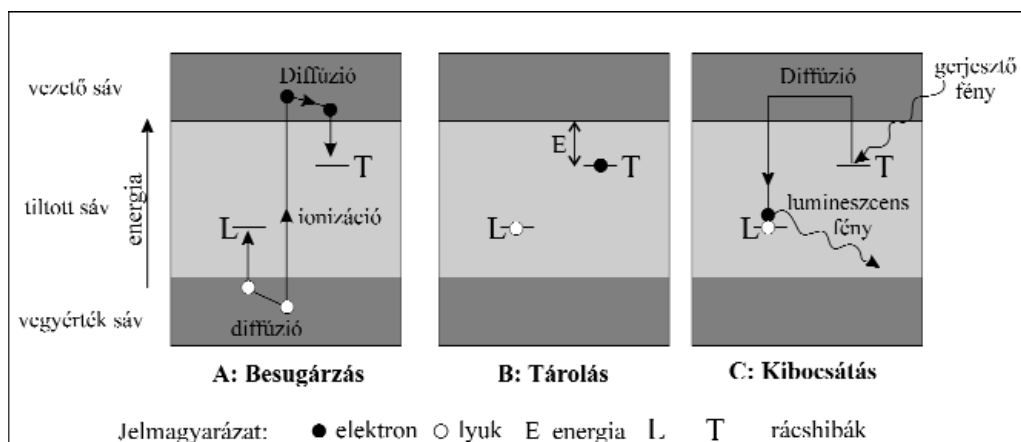
zással kapcsolatos szakkifejezések magyar szóhasználata még nem teljesen kiforrott, ezért a szövegben az eredeti angol kifejezések is szerepelnek.

Az OSL kormeghatározás alapjai

OSL kormeghatározásra az a lumineszcencia (lumineszcens jel) alkalmas, amely az ásványok kristályrácsában radioaktív sugárzás hatására felhalmozódott energia felszabadulásakor jelentkezik látható fénnel történő gerjesztés nyomán.

Az OSL komplex, és még nem teljesen ismert jelenség (pl. AITKEN 1998, BAILEY 2001, BØTTER-JENSEN et al. 2003b). Alapja a természetes kristályok esetében az, hogy azok nem tökéletesek, hanem olyan szennyeződések, illetve kristályrács hibákat tartalmaznak, amelyeket szabad töltések foglalhatnak el, és így csapdákat, illetve lumineszcens centrumok jönnek létre. Az OSL egyszerűsített energiaszint diagramja az 1. ábrán látható. A radioaktív, ionizáló sugárzás energiája gerjeszti az elektront, amely a vegyértéksávból a nagyobb energiaszintű vezető sávba kerül. Az elektron a vegyértéksávban lyukat hagy hátra. Ezután az elektron vagy visszakerül a vegyértéksávba, ahol újra egyesül a pozitív töltésű lyukkal, vagy az elektron és a lyuk is diffúzióval a tiltott zóna csapdáiba kerül (1. ábra, A). A lyuk a lumineszcens centrumban csapdázódik. A töltések a csapda tulajdonságaitól, élettartamától függően bizonyos ideig, másodperctől akár évmilliókig a csapdában maradnak (1. ábra, B). A csapdák élettartama függ a csapdák mélységétől, azaz az elektron csapdából való kiszabadulásához szükséges energiától, amit a hőmérséklet is befolyásol. OSL kormeghatározásra azok a csapdák alkalmasak, amelyek élettartama lényegesen hosszabb (legalább hússzor akkora), mint a vizsgált üledék betemetődési kora.

Megfelelő energia, OSL esetében megfelelő hullámhosszúságú fénnel történő megvilágítás, gerjesztés hatására az elektron a fényérzékeny csapdából kiszökik és a vezetési sáv érintésével újraegyesül (rekombinálódik) a lumineszcens centrumokban csapdázott pozitív töltésű



1. ábra. Az OSL egyszerűsített energiaszint diagramja AITKEN (1998) nyomán

Figure 1. Simplified energy level diagram of OSL after AITKEN (1998)

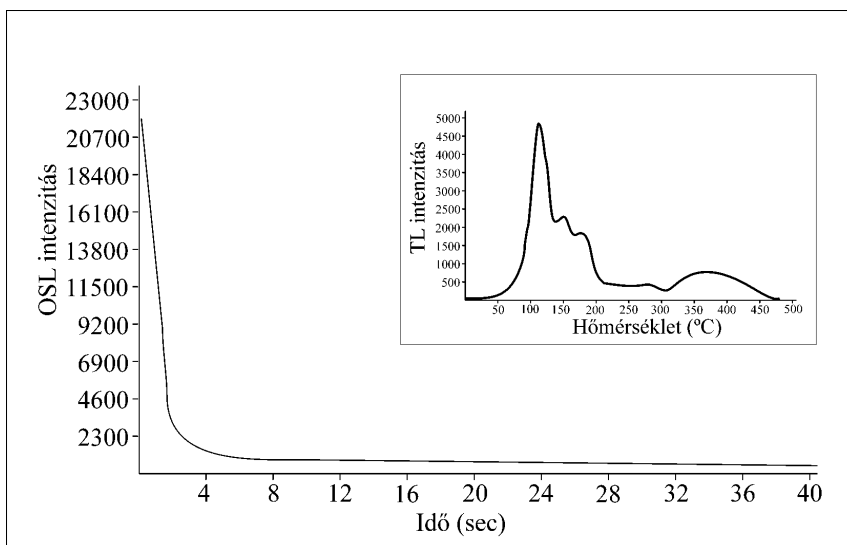
lyukkal, amit gyenge és rövid, általában néhány másodperces fénykibocsátásban megnyilvánuló energia felszabadulás, azaz OSL kísér (1. ábra, C; 2. ábra). A fényérzékeny elektroncsapdák kiürülése nemcsak a gerjesztő fény hullámhosszától függ, hanem a termikus rácsvibráció miatt a hőmérséklettől is (AITKEN 1985).

A kvarcban az OSL során elektroncsapdaként, illetve lumineszcens centrumként működhetnek olyan kristályrács hibák, mint az oxigénion-hiány, vagy többlet, az Al^{3+} , H^+ , és többnyire az egy pozitív töltéssel rendelkező fémionok, valamint egyéb szennyeződések kristályrácsba épülése (GOROBETS & ROGOJINE 2002), amelyek a lumineszcens fény színét is befolyásolják (AITKEN 1998).

A hőmérséklet fokozatos növelése mellett mért termolumineszcens szignálon, másként TL, illetve izzítási, vagy hevítési görbén (glow-curve) emissziós csúcsok jelzik azokat a hőmérsékleteket, amelyeken egy-egy csapdatípusba tartozó

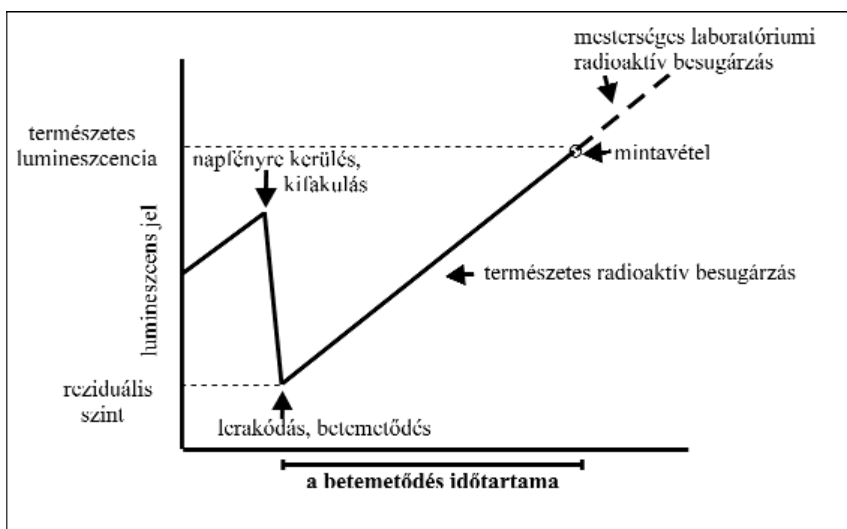
csapdák gyorsan, néhány másodperc alatt kiürülnek (2. ábra). A kvarc különböző csapdatípusaihoz tartozó TL csúcsok 85 és 375 °C között jelentkeznek, mélységük kb. 0,8 és 1,7 eV közé esik (AITKEN 1985, BAILEY 2001). A sekély, 200 °C alatt kiürülő csapdák instabilak, élettartamuk rövid, néhány órától pár száz évig terjed. OSL kormeghatározásra elsősorban a kvarc 325 °C táján jelentkező TL csúcsához tartozó csapdáival kapcsolatos lumineszcencia alkalmas. Ezeknek a csapdáknak az élettartama a hőmérséklettől függően változik, 0 és 20 °C között kb. száz millió év, és napfény hatására könnyen, percek alatt kiürülnek, emissziójuk 365 nm körüli (AITKEN 1985, HUNTLEY et al. 1996). A kvarc 375 °C-os TL csúcsához tartozó csapdák is hosszú élettartamúak, de csak lassan ürülnek ki UV fény hatására, ezért nem alkalmasak a lumineszcens kormeghatározásra (AITKEN 1985).

Az üledékképződés során, a felszínen napfény hatására az ásvány szemcsék kristályrácsának fényérzékeny csapdái



2. ábra. Tipikus OSL és TL görbe

Figure 2. Typical OSL and TL curves



3. ábra. Az OSL kormeghatározás elvi vázlatja AITKEN (1998) nyomán

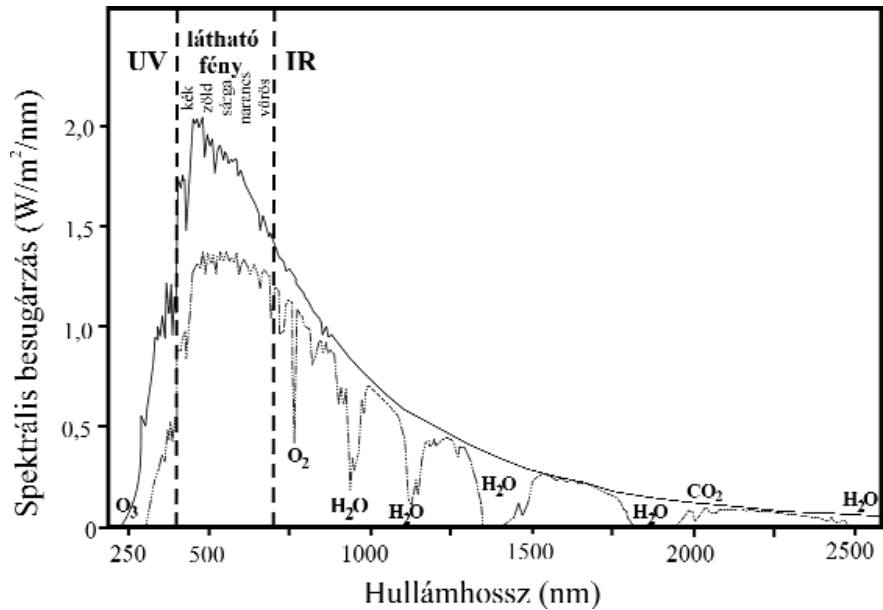
Figure 3. Schematic diagram of OSL age dating after AITKEN (1998)

fokozatosan kiürülnek, lumineszcens jelük lecsökken (3. ábra), ideális esetben lenullázódik, máskor megmarad egy reziduális szint. A reziduális szint az OSL esetében lényegesen kisebb, mint a TL esetében, ami az OSL kormeghatározás egyik nagy előnye. A lumineszcens csapdák fény hatására történő kiürülését kifakulásnak (bleaching) nevezzük, melynek gyorsasága elsősorban a fény hullámhosszától függ. A kvarc kifakulásához a napfény ultraibolya-zöld hullámhossz-tartománya és legalább 20 mW/cm² fényerősség a legmegfelelőbb. Ezen a fénytartományon belül a kifakulás szempontjából az UV fény határfoka a legnagyobb, a kékes színeké csak tizedannyi, a zöldes színeké még kisebb. A napfény erőssége a fény beesési szögétől, a tengerszint feletti magasságtól és a felhőzettől függően változik. Megfelelő fényerősség csak felhőtlen időben alakul ki, olyankor a kvarc OSL-je már 2 másodperc alatt a tizedére csökkent, míg gyenge napfényenél ehhez 12–130 másodperc szükséges (AITKEN 1998). A napfény a légkörön áthaladva főként a levegő O_3 , O_2 , CO_2 , H_2O tartalma miatt gyengül elsősorban az UV, a kék, és alárendeltbben a vörös fénytartományban (4. ábra). Vízben még erősebb a fény gyengülése, különösen a kifakuláshoz legmegfelelőbb hullámhossz-tartományban, ezért a vízmélység növekedésével lényegesen kevesebb, és a zöld spektrumban gazdagabb fény éri csak az üledéket, főként akkor, ha sok a

vízben a lebegő szilárd részecske, és ha turbulens az áramlás (JERLOV 1976). RENDELL et al. (1994) szerint 12–14 méteres vízmélység esetén a kvarcsemcsék három óra alatt fakulnak ki. A kifakulás gyorsaságát a szemcsék bevonata, és a hőmérséklet is befolyásolja. A szél által szállított szemcséket (dűne homok, lösz) többnyire megfelelő fény éri az üledékképződés során, így lumineszcens szignáljuk általában teljesen lenullázódik (pl. DULLER 2004), ezért ezek a legalkalmasabbak az OSL kormeghatározásra. A többi üledékes környezetben általában kevesebb fény éri a szemcséket, így azok különböző mértékben fakulnak ki (pl. DULLER 2004, JAIN et al. 2004, MURRAY et al. 1995). Folyóvízi üledékek esetében a kifakulás a szállítási távolságtól is függ, például egy kis esésű, 1–3 m mély folyóban 30 km-es szállítási távolság szükséges a megfelelő kifakuláshoz (STOKES et al. 2001).

Az ásványszemcsék csapdái lerakódás után betemetődve, fénytől elzárva fokozatosan újra feltöltődnek az őket érő radioaktív ionizáló sugárzás hatására (3. ábra). Ez a sugárzás elsősorban a környezet üledékek radioaktív izotópjainak bomlásából származik, amihez kismértékben a kozmikus sugárzás is hozzájárul. Az ionizáló sugárzás nagyságának és időtartamának növekedésével arányosan nő a csapdák feltöltődése egészen addig, amíg a csapdák teljesen telítődnek. A telítődés határt szab a lumineszcens kormeghatározásnak, mivel a további radioaktív sugárzás már nem okoz növekedést a lumineszcenciában.

A fénytől védett mintavétel, és a gyenge fény mellett végzett minta-előkészítés után mért lumineszcens fény, azaz a gerjesztés hatására kibocsátott fotonok száma arányos a csapdázott elektronok számával, ami pedig az ásványok által elnyelt radioaktív sugárzásból származó energia mennyiségével áll egyenes arányban (AITKEN 1998). Ezért a lumineszcens mérések során a természetes lumineszcencia és a különböző dózisu laboratóriumi mesterséges besugárzások hatására kialakult lumineszcencia alapján kiszámítható az üledékszemcsék által a betemetődés időtartama alatt elnyelt ionizáló sugárzás dózisa, pontosabban az azzal egyenértékű laboratóriumi béta vagy gamma dózis, vagyis az ekvivalens dózis (D_e), amit paleodózissal is neveznek. Az ekvivalens dózis SI mértékegysége a grey ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$, ami 1 kg anyag által elnyelt 1 J radioaktív energiának felel meg). A betemetett ásványszemcsék által időegység alatt elnyelt radioaktív ionizáló sugárzási energia a dózisirata (Gy/ezer év, vagy Gy/év), amely az OSL mintát körülvevő üledékanyag sugárzását mérve és a kozmikus sugárzás értékét az adott helyre kiszámítva, valamint az üledékanyag nedvességtartalmát figyelembe véve határozható meg. Az egyenérték dózis és a



4. ábra. A napfény spektruma és gyengülése a légkörben (Solar Radiation and Climate Experiment: SORCE)

- a napfény spektruma a külső atmoszférában, --- a napfény spektruma tengerszinten

Figure 4. Solar radiation spectrum and its attenuation in the atmosphere

- solar spectrum in the outside atmosphere, --- solar spectrum at sea level

dózisirata hányadosa megadja a lumineszcens kor, vagyis azt, hogy mikor érte utoljára megfelelő fény vagy hőhatás az üledéket, ami az előbbi esetben a betemetődés óta eltelt időtartamot fejezi ki:

$$\text{lumineszcens kor (ezer év)} = \frac{\text{egyenérték dózis (Gy)}}{\text{dózisirata (Gy/ezer év)}}$$

Mintagyűjtés és minta-előkészítés

Az OSL mintavétel megtervezését és a minták begyűjtését érdemes a kormeghatározással foglalkozó laboratórium munkatársával együtt, vagy vele előzetesen konzultálva végezni a módszer adta lehetőségek kiaknázása és a felmerülő problémák ismerete érdekében. A lumineszcens minták begyűjtése és előkészítése során (pl. AITKEN 1985, 1998, WINTLE 1997, WALLINGA 2002) nagyon fontos, hogy a szemcséket ne érje fény, illetve a lehető legkevesebb fény érje. Ezért a mintavételt általában fényt át nem eresztő (PVC) csővel végezzük feltárásból vagy fúrásból. Kemény üledékanyagból pl. löszből a mintát kifuragjuk és azonnal fényt át nem eresztő fekete műanyag zacskóba helyezük. A fényhatás kiküszöbölése érdekében a mintavétel történhet sötétítő anyag alatt is. Az OSL minta közvetlen környezetéből nedvességtartalom meghatározásra jól záródó mintatárolóba gyűjtünk anyagot, és az üledék radioaktív izotóp tartalmának vizsgálatához kb. 1 kg reprezentatív mintát veszünk. A MÁFI-ban jelenleg alkalmazott, a kvarcsemcsék lumineszcens mérésén alapuló OSL kormeghatározására elsősorban a homokok alkalmasak, de kőzetliszt, illetve lösz, paleotalaj, és egyéb üledékek

is megfelelőek, ha elegendő homokfrakciót tartalmaznak, és ha feltehetően megfelelő fény érte őket a betemetődés előtt. Azok a homogén, legalább 50–60 cm vastag rétegek a legalkalmasabbak a kormeghatározásra, amelyekről feltételezhető, hogy betemetődésük időtartamának nagy része alatt legalább 30 cm vastag üledék fedte őket. A feltárások, illetve a fúrások függőleges szelvényében legalább két minta vizsgálata szükséges, ami sztratiográfiai kontrollt biztosít.

A minták előkészítése, azaz a tiszta kvarcfrakció előállítását sötétben, gyenge vörös fény mellett történik, ami nem okoz számottevő változást a kvarc lumineszcenciájában. A mintavétel során esetleg fényt kapott üledékanyagot eltávolítjuk (a mintavevő cső végeinél és a kifaragott kőzetdarab felszínén).

Az OSL kormeghatározást a 90–225 μm közé eső frakciók valamelyikén végezzük, leggyakrabban a 160–200 μm -es kvarc szemcséken. Ez az ún. durvaszemű módszer. Az előkészítés során az üledékanyagból hidrogén-peroxiddal eltávolítjuk a szerves anyagot, és 10%-os sósavval a karbonátokat. A vizsgálni kívánt szemcsefrakciót vizes szitálással különítjük el, majd a kiszáritott mintából a kvarcdús részleget nátrium-poliwolframát (SPT: $\text{Na}_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}]\text{H}_2\text{O}$) vizes oldatából készült nehézfolyadék segítségével szeparáljuk. A kvarcfrakciót még szennyező földpátok eltávolítása és a kvarc szemcsék alfa sugárzásnak kitett, kb. 10 μm -es felszíni rétegének lemaratása érdekében 60 perces 40%-os hidrogén-fluoridos etetést alkalmazunk. Ha szükséges, akkor a csillámokat papírlapon való görgetéssel, vagy koagulációt gátló anyag (pl. Calgon) vizes oldata és ultrahang segítségével dezaggregáció után szitálással távolítjuk el. A minták előkészítése időigényes, és az alkalmazott vegyszerek veszélyesek, ezért nagy körültekintéssel, jó elszívású vegyifülke alatt és megfelelő védőfelszerelésben kell velük dolgozni.

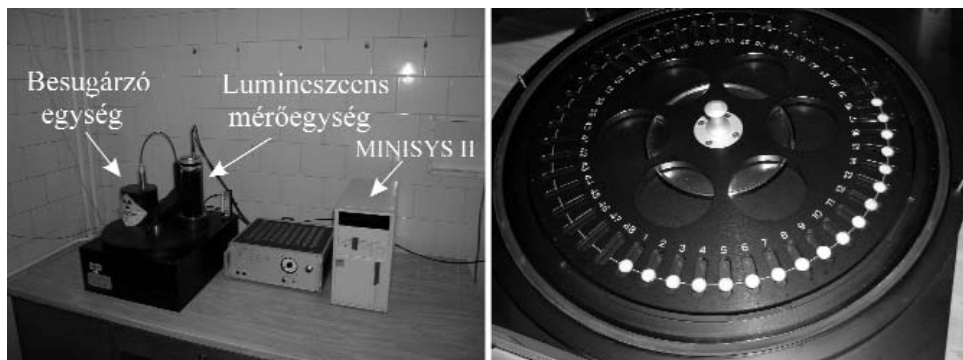
Az előállított tiszta kvarcfrakció szemcséit 10 mm átmérőjű rozsdamentes acél mintatartó korongok (diszkek) közepére ragasztjuk fel 1–8 mm átmérőjű területre szilikon spray segítségével, úgy hogy a szemcsék egyetlen réteget alkossanak. A lefedett terület nagyságának megfelelően kis, közepes vagy nagy részmintákon (small, medium, large aliquot) végezzük a méréseket. A kis részminták a szemcsék méretétől függően 20–200 db, a nagy aliquotok ezer–három-

ezer szemcsét tartalmaznak. Az OSL kor pontossága annál nagyobb, minél kisebb és minél több részmintán történnek a mérések (WALLINGA 2002). TRUELSEN & WALLINGA 2003 vizsgálatai szerint a fiatal folyóvízi üledékek esetében a nagyobb homokszemcsék alkalmasabbak a vizsgálatra, mint a kisebbek, mivel az előbbiek jobban kifakultak a betemetődés előtt. A kvarcfrakció tisztaságát lumineszcens méréssel, az ún. infravörös-teszt segítségével ellenőrizzük, és ha a tisztaság nem megfelelő, akkor további félórás hidrogén-fluoridos kezelést alkalmazunk.

SAR-OSL mérések

A MÁFI-ban az OSL méréseket a dán RISØ National Laboratory által kifejlesztett RISØ TL/OSL DA-15C/D típusú berendezéssel végezzük (BØTTER-JENSEN et al. 2000). A műszer egy mérő és egy besugárzó egységből áll (5. ábra), melyet a RISØ által kifejlesztett számítógép (MINI-SYS II) vezérel egy másik, Windows alapú számítógép segítségével. A berendezés kivehető mintatartó kerekében 48 db mintatartó korongnak van hely, melyeket a kerék elfordulása juttat besugárzási és mérési helyzetbe. Az utóbbi helyen történik a szemcsék megvilágítása és szükségesség szerinti felmelegítése is.

A mérések során a lumineszcens jel gerjesztése állandó intenzitású kék fényű, 470 ± 20 nm hullámhosszúságú, 2.10 eV energiájú fotonokból álló, kb. 50 mW/cm^2 intenzitású megvilágítással történik, amit 28 db LED biztosít. Bizonyos mérésekhez infravörös 870 ± 40 nm-es megvilágítást alkalmazunk. A kék fény a kvarc és a földpátok lumineszcenciáját is gerjeszti, az infravörös fény viszont csak a földpátokét. A kvarc lumineszcens emissziója a közeli UV tartományban 365 nm körül jelentkezik, a földpátoké az ibolya színtartományban, 410 nm körül. A lumineszcens fényt, amely a gerjesztő fényénél nagyobb energiájú, fotoelektron-sokszorozó (PM cső, bialkali EMI 9235QB PMT) detektálja a 340 ± 80 nm-es hullámhossztartományban. A PM cső elé beiktatott fényszűrő (Hoya U-340 filter) biztosítja, hogy csak a megfelelő hullámhosszúságú fény érje el a PM csövet. A beütések számát sokcsatornás analízátor rögzíti 40 másodpercen keresztül. A mérési adatokból kirajzolódik az OSL-szignál, azaz az OSL görbe (lecsengési görbe, elhalványulási



5. ábra. RISØ TL/OSL DA-15C/D típusú lumineszcens mérőberendezés és a mintatartó kerék (Magyar Állami Földtani Intézet)

Figure 5. RISØ TL/OSL DA-15C/D luminescence instrument with the sample holder wheel (Geological Institute of Hungary)

görbe, decay curve, shine-down curve), ami a lumineszcens fény intenzitását, vagyis a beütésszámot a gerjesztési idő függvényében ábrázolja (2. ábra). Ez a görbe folyamatosan csökken annak megfelelően, ahogy csökken a lumineszcencia hatásfoka (efficiency), vagyis a csapdákban kiszabaduló és fénykibocsátással kísérve rekombinálandó elektronok száma. A csökkenés eleinte gyors, majd egyre lassabb, amit a lumineszcencia hatásfokának változása, a kiszabadult töltések egy részének lumineszcencia nélküli újracsapdázódása, vagy rekombinációja, valamint a különböző ütemben kiürülő csapdatípusok jelenléte okoz. Az OSL görbe lefutása a gerjesztő fény intenzitásától és a hőmérséklettől is függ. Egyetlen OSL görbe több különböző fényérzékenységgel rendelkező elektroncsapda típus, populáció exponenciálisan csökkenő OSL görbéjének összegződéséből áll. A görbe kezdeti szakaszát, a korai fényt a gyorsan kiürülő csapdák adják (gyors, esetleg ultra gyors komponens), a későbbi szakasz a lassabban kiürülő csapdákval kapcsolatos (közepes és lassú komponensek). A görbéhez a gerjesztő fényt szórt fotonjai és a PM cső által detektált háttérérték is hozzájárul. Az OSL kormeghatározásra általában az a minta alkalmas, amely lumineszcens szignáljában a gyors komponens dominál. Az OSL görcs dekonvolúciójával, görbeillesztés segítségével elkülöníthetők a görbe különböző exponenciális komponensei (pl. BAILEY et al. 1997, KUHNS et al. 2000, WINTLE & MURRAY 2006).

A lumineszcens mérőműszerben a minták ekvivalens dózisának meghatározásához szükséges laboratóriumi radioaktív besugárzást $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ zárt sugárforrás biztosítja, amely max. 2,27 MeV energiájú β részecskéket bocsát ki. A mintatartó korongokon elhelyezett szemcséket a MÁFI műszere esetlegesen jelenleg kb. 0,11 Gy/s sugárzás éri, melynek aktuális értékét a radioaktív bomlás miatt időnként újra meg kell határozni, illetve havonta ki kell számítani.

A kívánt mérőeszerrel programfájlban adjuk meg, amely tartalmazza a megvilágítás fajtáját (kék vagy infravörös), intenzitását és időtartamát, a minta felmelegítési sebességét és maximális hőmérsékletét, a radioaktív besugárzások időtartamát, a lumineszcens mérés időtartamát, és az OSL mérési görbe adatpontjainak számát. 200 °C-nál magasabb hőmérséklet alkalmazása esetén az oxidáció és az abból adódó hamis lumineszcencia elkerülése érdekében nitrogénnel feltöltött térben történnek a mérések. Egy-egy mérőeszerrel lefutásának időtartama több óra, több nap is lehet. A lumineszcens jelek, azaz a mérési görbék megtekintése és kiértékelése erre a célra kifejlesztett programok, elsősorban a Viewer és az Analyst program segítségével történik.

Az OSL kormeghatározáshoz különböző mérési módszereket dolgoztak ki (AITKEN 1998). Eleinte az ún. multiple-aliquot (többrészmintás) módszert alkalmazták, melynek során egy-egy részminta csoporton különböző méréseket végeztek. Ennek a módszernek az ún. additív dózis változata esetében a részminták egy csoportjának lumineszcenciáját természetes állapotban mérték, a többi pedig különböző, egyre növekvő dózisú laboratóriumi besugárzás után, ami a részminták súly szerinti normalizációját is szükségessé tette (pl. HUNTLEY et al. 1985).

A lumineszcens mérések során alkalmazott melegítés hatására elektronok kerülhetnek a kormeghatározásra használt csapdákba termikus átmenettel. Ezt a kedvezőtlen hatást a módszer továbbfejlesztésével, a termikus átmenet korrekcióba vételével küszöbölték ki (additive-dose with thermal-transfer correction: ADTT). Mivel a lumineszcens szignál késői része a kormeghatározás szempontjából zavaró, ezért nem a teljes szignál, hanem annak kezdeti részéből a késői részt kivonva nyert összegzett, integrált érték használata terjedt el (late-light subtraction, AITKEN 1998). Az additív módszerek esetében az egyenérték dózis meghatározásához extrapoláció szükséges, ami bizonytalanságokat okoz. Ezért dolgozták ki az interpoláción alapuló regenerációs módszert. A természetes dózis mérése után és a laboratóriumi besugárzás előtt alkalmazott megvilágítás a fényérzékeny csapdákot kiüríti, azaz a lumineszcenciát lenullázza. Részleges kifakulás módszert (partial bleach method) és ausztrál csúsztató módszert (australian slide method) is kidolgoztak. A multiple-aliquot módszerek hátránya, hogy normalizáció is szükséges, mivel a részminták mennyisége és OSL érzékenysége is különböző. Ezért került sor az 1990-es évek elején az ún. single-aliquot (egy részmintás) módszer kifejlesztésére, amely során minden egyes részminta (aliquot) ugyanolyan kezeléseken és méréseken esik át. Ennek a módszernek is van additív (SAAD: Single-Aliquot Additive Dose), valamint regenerációs és additív (SARA: Single Aliquot Regenerative and Added Dose) változata is. Ezek a módszerek a mérések során tapasztalható lumineszcens érzékenység változást is ellenőrizik (AITKEN 1998), és ezt a változást a csak regenerációt alkalmazó SAR (Single Aliquot Regenerative Dose) eljárás korrekcióba is veszi. A lumineszcens érzékenység az elektronok csapdázódásának valószínűsége, ami a rendelkezésre álló lumineszcens centrumok, csapdák, illetve kristályrészecskék relatív számától függ. A lumineszcens érzékenység változása a TL gömben 110 °C-on csúcsot adó csapdák segítségével vizsgálható. Ez minden egyes OSL mérés után egy kisebb dózisú radioaktív besugárzás, az ún. teszt dózis alkalmazásával, és az annak nyomán fellépő lumineszcencia mérésével történik (MURRAY & ROBERTS 1998, MURRAY & WINTLE 2000, 2003, MURRAY & OLLEY 2002, WINTLEY & MURRAY 2006). Jelenleg ezt a SAR-OSL módszert alkalmazzuk a MÁFI-ban is. A single-aliquot módszernek az is nagy előnye a multi-aliquot módszerrel szemben, hogy egészen kis részminták, sőt akár az egyes szemcsék egyenérték dózisának meghatározását is lehetővé teszi. Ez különösen olyan üledékek esetében fontos, amelyek szemcséi a betemetődésük előtt különböző mértékben fakultak ki.

Sokféle üledékes fácies kvarcsejtszemcséin végeztek már SAR-OSL kormeghatározást, és a kapott korok helyességét független, elsősorban ^{14}C , ritkábban ^{210}Pb korokkal igazolták, bár eltérések is előfordultak (WINTLE & MURRAY 2006). A kvarc OSL kormeghatározása sok szempontból előnyösebb, mint a földpátoké, mivel a kvarc gyakoribb és ellenállóbb ásvány, lumineszcens jele a napfény hatására gyorsabban lenullázódik, és a földpátokkal ellentétben a

kvarcban nem lép fel anomális kifakulás (anomalous fading, melynek során normál hőmérsékleten elektronok szöknek ki a termikusan stabilnak tekintett csapdákból). Ugyanakkor a kvarc esetében hátrányt jelent, hogy gyengébb, halványabb a lumineszcenciája, kisebb radioaktív dózis hatására telítődik, és nagyobb termikus transzfer léphet fel benne a földpátokhoz képest, valamint hogy a kvarc SAR-OSL módszerrel többnyire csak 100 ezer évesnél fiatalabb korok határozhatóak meg, míg a földpát mérésével akár 200–300 ezer éve lerakódott üledékek is datálhatóak. Az újabb kutatások során kidolgozott kvarc TT-OSL (thermally-transferred optically stimulated luminescence) módszerrel viszont idősebb korok is nyerhetők, ha az üledék kvarcsezemcséinek elég fényes a lumineszcenciája (pl. TSUKAMOTO et al. 2008). A kvarcfrakciót esetleg szennyező földpátok zavaró lumineszcenciájának kiszűrését a Post-IR-OSL módszer alkalmazása teszi lehetővé (pl. MAUZ & LANG 2004), míg pulzáló megvilágítás segítségével elkülöníthető a kvarc és a földpát lumineszcenciája (pulsed-OSL, pl. DENBY et al. 2006).

SAR-OSL mérésorozat

A Magyar Állami Földtani Intézetben jelenleg hét fő lépésből álló SAR-OSL mérésorozatot alkalmazunk, amelyre egy példa az 1. táblázatban látható:

1. lépés: a szemcsék radioaktív besugárzása a regenerációs dózissal (D_i , regenerative dose) melynek hatására töltések csapdázódnak. Ez a lépés a mérésorozat legelején kimarad, amikor a minta természetes dózist akarjuk mérni. Egy mérésorozat során legalább három különböző, egyre nagyobb regenerációs dózis alkalmazása szükséges, melyeket úgy kell megválasztani, hogy a minta természetes dózisanál kisebb és nagyobb dózis is legyen közöttük.

2. lépés: a szemcsék előmelegítése (preheat) 160 és 300 °C közötti hőmérsékletre (az 1. táblázat példájában 10 másodpercen át 260 °C-ra). Az előmelegítés a geológiai időléptékben termikusan instabil, sekély, hőérzékeny OSL csapdákat kiüríti, azért hogy a mért lumineszcens jel csak a termikusan stabil, elég hosszú élettartamú csapdák kiürülésével legyen kapcsolatos (AITKEN 1998).

3. lépés: kék fényű megvilágítás, stimuláció, azaz gerjesztés, és az annak hatására fellépő lumineszcens fény

(L_i) mérése 40 másodpercen át 125 °C-on. Ennyi idő alatt az OSL kormeghatározásra alkalmas fényérzékeny csapdák többsége kiürül. A mérés során a 125 °C-os hőmérséklet biztosítja, hogy az elektronok ne csapdázódjanak újra a 110 °C-os TL csapdákból.

4. lépés: a szemcsék radioaktív besugárzása a teszt-dózissal (D_T), amely egy-egy minta esetében egy állandó érték, amit úgy kell megválasztani, hogy nagyjából a természetes dózis harmadrésze legyen, és hogy csak elhanyagolhatóan kis termikus átmenetet okozzon. A teszt-dózis alkalmazása a lumineszcens érzékenység változással való korrekció céljából szükséges.

5. lépés: melegítés az előmelegítésnél kisebb hőfokra, a példa esetében 200 °C-ra, majd a melegítés hirtelen megszakítása (cut-heat). Ez a melegítés a teszt-dózis hatására feltöltődött csapdák közül a hőérzékenyeket kiüríti, viszont nem okoz további érzékenységváltozást.

6. lépés: kék fényű megvilágítás és a teszt-dózis miatti lumineszcencia (T_i) mérése 40 másodpercen át 125 °C-on.

7. lépés: újabb kék fényű megvilágítás 40 másodpercen át 280 °C-on (illumination), melynek hatására az összes fényérzékeny OSL csapda kiürül.

A melegítések során a hőmérsékletemelkedés 5 °C/s, és az egyes lépések között a szemcsék 60 °C-ra hűlnek le. A mérésorozat legvégén az egyes részminták tisztaságát is ellenőrizzük. Ehhez az utolsó regenerációs dózis megismétlése után előbb az infravörös, majd a kék fényű megvilágítás hatására adott lumineszcens jeleket mérjük, és hasonlítjuk össze úgy, ahogy a később bemutatásra kerülő IR-teszt során.

Az egyenérték dózis meghatározása

A részminták egyenérték dózisének meghatározásához az 1. táblázatban feltüntetett hét lépésből álló ciklus legalább hatszori lefuttatása (run 1–6) szükséges, úgy, hogy az 1. lépésben különböző dózisú radioaktív besugárzást (D_i) alkalmazunk. Az első ciklus lefutása során (run 1) a szemcsék nem kapnak laboratóriumi besugárzást, így azok természetes lumineszcenciáját mérjük (L_n). A második ciklus során a várható természetes dózissal kisebb dózissal történik a besugárzás (D_1 : első regenerációs dózis) és az arra adott lumineszcens jelet mérjük (L_1 : első regenerációs OSL). A harmadik ciklusban a természetes dózishoz hasonló besugárzást alkalmazunk (D_2 : második regenerációs dózis, L_2 : második regenerációs OSL). A negyedik futtatáskor az előzőknél nagyobb dózissal történik a besugárzás (D_3 : harmadik regenerációs dózis, L_3 : harmadik regenerációs OSL). A következő ciklusban nincs besugárzás ($D_4=0$: negyedik regenerációs dózis, L_4 : negyedik regenerációs OSL). Ideális esetben ekkor nem jelentkezik lumineszcencia. Az utolsó ciklus lefutása során a besugárzás újra a legkisebb dózissal történik ($D_5=D_1$: ötödik regenerációs dózis, L_5 : ötödik regenerációs OSL). Ekkor ideális esetben ugyanolyan lumineszcencia jelentkezik, mint az első regenerációs dózis hatására.

A műszer a 40 másodperces megvilágítás alatt 0,16 másodpercenként, azaz 250 alkalommal rögzíti az aktuális

1. táblázat. A SAR-OSL mérésorozat lépései (WINTLE & MURRAY 2006)

Table 1. Steps of SAR-OSL protocol (WINTLE & MURRAY 2006)

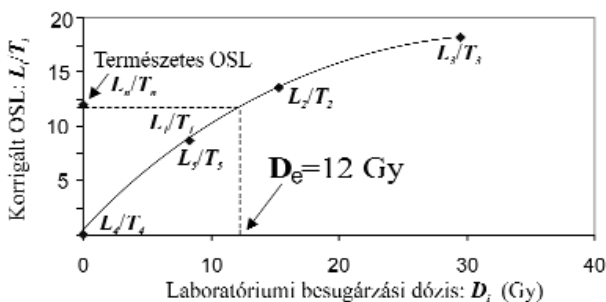
Lépés	Kezelés	OSL mérés
1.	radioaktív besugárzás: D_i	?
2.	előmelegítés 10s 260 °C (preheat)	?
3.	stimuláció* 40s 125 °C	L_i
4.	radioaktív besugárzás teszt dózissal: D_T	?
5.	melegítés 200 °C (cutheat)	?
6.	stimuláció* 40s 125 °C	T_i
7.	stimuláció (illumination)* 40s 280 °C	?
	vissza az 1. lépésre	

*: kék fényű megvilágítás, s: másodperc, további részletek a szövegben

*: blue light stimulation, s: second, more details are in the text

lumineszcenciát, vagyis a PM csőben a beütések számát. Ezekből az adatokból áll össze az OSL görbe (2. ábra). A további számítások alapját az OSL görbe kezdeti, gyorsan csökkenő szakasza adja (általában az első 0,8 s), úgy hogy e szakasz integrált adataiból kivonásra kerül az alap- vagy háttérérték (utolsó 3,84 s). Ha a kvarcfrakciót földpát szennyezi, vagy ha nem a gyors OSL komponens dominál benne, akkor azt az OSL görbe alakja, lassabban csökkenő lefutása is tükrözi (AITKEN 1998, STEFFEN et al. 2009), ami a korbecslésben hibát okoz.

A SAR eljárás során a hőkezelés és a radioaktív besugárzás hatására az ásványsemcsék lumineszcens érzékenysége változik. Ezért minden egyes kis rész minta (aliquot) lumineszcenciáját korrigálni kell a lumineszcens érzékenységváltozással, ami a teszt dózis segítségével végezhető el. A korrigált OSL a természetes, illetve regenerációs dózisok és az utánuk adott teszt dózis hatására létrejött lumineszcens jel hányadosa (L_n/T_n , L_1/T_1 , L_2/T_2 , L_3/T_3 ..., MURRAY & WINTLE 2000), amit a regenerációs dózisok (D_1 , D_2 , D_3 ...) függvényében ábrázolva megkapjuk az érzékenységváltozással korrigált dózisválaszgörbét (sensitivity-corrected dose-response curve, 6. ábra). A rész minta korrigált természetes lumineszcenciáját (L_n/T_n) a görbére vetítve interpolációval határozzuk meg az egyenérték dózist (D_e). Ideális esetben ez megfelel az utolsó napfénynek való kitétség óta elnyelt radioaktív sugárzás dózisának.



6. ábra. Korrigált regenerációs OSL görbe (dózis-válaszgörbe)

Figure 6. Sensitivity-corrected regenerated OSL curve (dose-response curve)

Ha egy mintán mért egyenérték dózis értékek viszonylag szűk tartományban mozognak és eloszlásuk szimmetrikus (normál) akkor a kormeghatározáshoz általában elegendő 24 db rész minta D_e értékét meghatározni. Ha viszont az ekvivalens dózisok eloszlása aszimmetrikus, ferde, akkor több, akár 70–100 db kisméretű rész mintán szükséges a méréseket elvégezni.

Egyéb vizsgálatok, tesztek

Az alkalmazni kívánt lumineszcens mérések és az adott minta OSL kormeghatározásra való alkalmasságát különböző teszt mérések segítségével vizsgáljuk.

A recirkuláció arányteszt (recycling ratio test) segítségével azt vizsgáljuk, hogy a teszt dózis alkalmazásával az OSL görbe megfelelően korrigálható-e. Ehhez egy regenerációs besugárzást (azaz a regenerációs dózisgörbe

legalább egy adatpontját) meg kell ismételni a SAR mérésorozatban. Általában az első és egyben a legkisebb regenerációs dózist szokás megismételni (pl. $D_5=D_1$). A két besugárzás után mért és korrigált lumineszcencia hányadosa a recirkuláció arány, pl. $(L_3/T_3)/(L_1/T_1)$. Ideális esetben ez az arány 1, ezért azok az ekvivalens dózis értékek fogadhatók el, amelyek esetében a recirkuláció arány 0,90 és 1,10 közötti (MURRAY & WINTLE 2000).

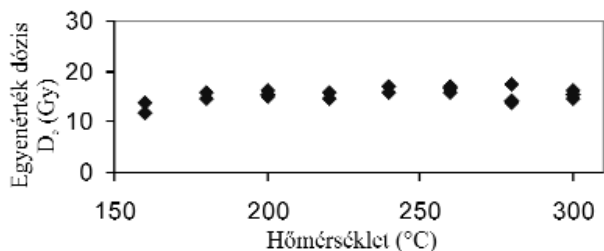
A rekuperáció teszt (recuperation test) azt vizsgálja, hogy besugárzás nélkül (pl. $D_i=0$) a SAR ciklus utolsó lépésében alkalmazott stimuláció (illumination) hatására a rész minta lumineszcens jele lenullázódik-e. Ha nem, akkor az alkalmazott megvilágítás időtartama nem elég hosszú, vagy a megvilágítás és az előmelegítés során töltések kerülnek a mélyebb csapdákból a lumineszcens csapdákból a megvilágítás után mért és korrigált lumineszcencia a minta természetes lumineszcenciájának százalékában kifejezve adja meg: $R\%=(L_i/T_i)/(L_n/T_n) \cdot 100$. Csak azok a mérési eredmények fogadhatók el, amelyekben a rekuperáció nem haladja meg a minta természetes dózisának 5%-át (MURRAY & WINTLE 2000). A rekuperáció a SAR ciklusok végén 40 másodperces, 280 °C-on történő kék fényű megvilágítással (illumination) szorítható le a minimumra (WINTLE & MURRAY 2006).

A dózis visszanyerési teszt (dose recovery test) alapján megállapítható, hogy az alkalmazott SAR mérésorozat alkalmas-e a minta természetes dózisának pontos meghatározására, és hogy a teszt dózis használatával megfelelően korrigálható-e az OSL görbe. Ehhez a SAR mérésorozat elején a rész minták természetesen csapdázott töltéseit eltávolítjuk, azaz lumineszcenciájukat lenullázzuk, amihez két 100 másodperces időtartamú kék fényű megvilágítást használunk melegítés nélkül, 10 000 másodperces pihentetéssel a két megvilágítás között. Ezután a minta várható természetes dózisának megfelelő besugárzás és az emiatt fellépő lumineszcencia mérése következik (MURRAY & WINTLE 2003). A további besugárzások és mérések a már bemutatott SAR eljárásnak megfelelően folynak. A SAR mérésorozat alkalmazása és a korrekció csak akkor megfelelő egy adott minta esetében, ha a rész mintára kiszámított ekvivalens dózis és a besugárzaskor alkalmazott ismert laboratóriumi dózis hányadosa 1, illetve 0,90 és 1,10 közötti. Ez az érték az elérhető maximális pontosságot is megadja, amit a kor hibájának kiszámításakor is figyelembe kell venni.

Az infravörös-teszt (IR test) a kvarcfrakció tisztaságának vizsgálatára szolgál. Ehhez előbb az infravörös, majd a kék fényű megvilágítás hatására fellépő lumineszcenciát mérjük. Mivel a kvarc csak kék fényű megvilágítás hatására ad lumineszcenciát, a földpátok viszont infravörös és kék fényű stimuláció esetén is, ezért a kvarcfrakció csak akkor megfelelő tisztaságú, ha az infravörös gerjesztés hatására adott lumineszcenciája kicsi, csak néhány százaléka a kék megvilágításra kialakult lumineszcenciájának. Ezt a tesztet az ekvivalens dózis meghatározásakor a szokásos SAR mérésorozat végén minden egyes rész mintára alkalmaz-

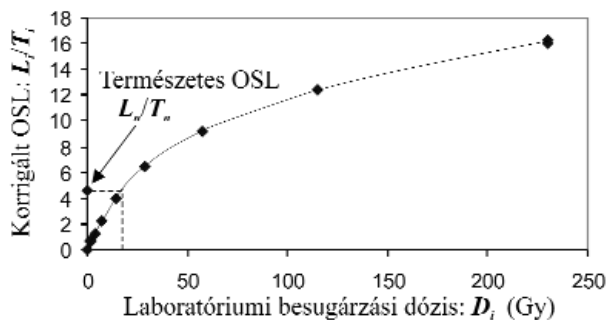
zuk, és az így felismert szennyezett részminták D_e eredményeit a kormeghatározás során figyelmen kívül hagyjuk. Ha a mintából nem sikerül megfelelő tisztaságú kvarcfrakciót előállítani (pl. földpát zárványok miatt), akkor az ekvivalens dózis meghatározáshoz az OSL méréseket a földpát lumineszcens jelét lenullázó IR stimuláció után lehet elvégezni. (Post-IR OSL pl. BANERJEE et al. 2001, WATANUKI et al. 2003).

Az előmelegítési platóteszt (preheat plateau teszt) a megfelelő előmelegítési hőmérséklet megállapításához szükséges, mivel az előmelegítés a termikus átmenetet is befolyásolja. Ehhez a SAR mérésorozatban a részmintákat hármasával 160 és 300 °C között nyolc különböző, 20 °C-onként növekvő hőmérsékletre melegítjük fel. Az így kapott ekvivalens dózisértékek az előmelegítési hőmérséklet növekedésével eleinte egyre nagyobbak, majd beállnak egy viszonylag állandó értékre, azaz platót alkotnak (7. ábra). A lumineszcencia mérése előtt az előmelegítéskor olyan hőmérsékletet kell alkalmazni, amelynél az egyenértékű dózis (D_e) a platóra esik.



7. ábra. Az előmelegítési platóteszt eredménye diagramon ábrázolva
Figure 7. Diagram of the results of preheat plateau test

A növekedési görbetezt (growth curve test) segítségével azt vizsgáljuk, hogy hogyan változik a minta lumineszcenciája a radioaktív sugárzás dózisének növekedése hatására, és hogy a D_e értékek meghatározása során mekkora dózisos alkalmazása megfelelő. Ekkor a SAR mérésorozatban a részminták természetes lumineszcenciájának mérése után az egyre nagyobb laboratóriumi radioaktív besugárzások (pl. 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 Gy) hatására fellépő lumineszcencia kerül detektálásra. A mérések alapján számított egyenértékű dózisokat (D_e) a laboratóriumi besugárzási dózisok függvényében ábrázolva előáll a növekedési görbe (8. ábra). Ez a görbe eleinte lineárisan



8. ábra. Növekedési görbe
Figure 8. Growth curve

növekszik, mivel az egyre nagyobb sugárdózisok arányosan egyre nagyobb lumineszcenciát okoznak, majd a növekedés mértéke lelassul, mert a csapdák fokozatosan feltöltődnek, telítődnek. A csapdák teljes telítődése miatt egy bizonyos dózis felett a további radioaktív sugárzás már nem okoz D_e növekedést. Az a minta a legalkalmasabb a kormeghatározásra, amelynek természetes lumineszcenciája a növekedési görbe lineáris szakaszára esik. Ezen túl már nagyobb a kor bizonytalansága. A telített minták nem alkalmasak a kormeghatározásra, illetve csak a minimum koruk állapítható meg.

A termikus átmenetteszt (thermal transfer test) az előmelegítés nemkívánatos hatását vizsgálja, úgy hogy megfelelő megvilágítás után, besugárzás nélkül méri az előmelegített szemcsék lumineszcenciáját, amely ideális esetben nulla. Az előmelegítés (főként az első előmelegítés) során azonban a töltések a viszonylag sekély és fényre nem érzékeny csapdákból a mélyebb OSL csapdába kerülhetnek termikus átmenettel, és így hozzájárulnak a lumineszcens szignálhoz. A termikus átmenet függ a termikus stabil, fényre nem érzékeny csapdákból lévő elektronok számától, a mintát betemetődés előtt ért fényhatástól, és a laboratóriumi radioaktív sugárzás dózisével is (AITKEN 1998). A teszt során a SAR mérésorozat a részminták természetes lumineszcenciájának lenullázásával kezdődik két 100 másodperces időtartamú kék fényű megvilágítással, melegítés nélkül, és 10 000 másodperces pihentetéssel a két megvilágítás között. Ezután a besugárzások és mérések a SAR eljárásnak megfelelően történnek (MURRAY & WINTLE 2003, WINTLE & MURRAY 2006). Az előmelegítési hőmérséklet csökkentésével általában a termikus átmenet is csökken. A minta csak akkor megfelelő az OSL-SAR kormeghatározásra, ha a termikus átmenet elhanyagolhatóan kicsi (WINTLE & MURRAY 2006), ha nem éri el a természetes dózis 1%-át.

A dózisiráta meghatározása

Az OSL kor kiszámításához szükséges dózisiráta (D) a betemetett üledék által időegység alatt elnyelt radioaktív sugárdózis (mGy/év, vagy Gy/ezer év). A dózisiráta nagyobb része az üledék radioaktív izotópjai által kibocsátott alfa, béta és gammasugárzásból, kisebb hányada, általában néhány %-a pedig a kozmikus sugárzásból ered ($D = D_\alpha + D_\beta + D_\gamma + D_c$). Az üledék radioaktív izotóptartalmának meghatározása leggyakrabban az OSL minta közvetlen környezetéből vett kb. 1 kg reprezentatív mintanyag nagy felbontású gamma-spektrometriai mérésével történik. Egyéb módszer, például alfa-spektrometria, alfa, ill. béta részecskeszámláló, neutron aktivációs, atom abszorpciós, röntgen fluoreszcens, ICP-MS, vagy lángfotometriás vizsgálat is alkalmazható. Az üledékanyag változékonysága miatt, és a pontosabb eredmény érdekében a feltárások szelvényében is végeznek helyszíni méréseket gamma-spektrométerrel, vagy doziméter kapszulával (AITKEN 1998).

Az üledékek radioaktív sugárzása elsősorban az ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{87}Rb és leányizotópjaiktól származik. Ezek közül a ^{40}K a leggyakoribb, a természetes K-atomok között kb. 0,01% a részaránya. A radioaktív U- és Th-izotópok ritkábbak, a ^{87}Rb a legritkább. Az α sugárzás lokális hatású, behatoló képessége kicsi, a kvarc szemcséknek csak a külső kb. 10 μm vastag felszíni rétegét érinti, ami a minták előkészítése során alkalmazott 90 perces hidrogén-fluoridos étetéssel eltávolítható. Ez az OSL kor kiszámítását jelentősen megkönnyíti (AITKEN 1985, 1998). Így a dóziszráta kiszámítása módosul, például 100 μm méretű lemaratott felszínű kvarcsemmek esetén $D=0,9D_{\beta}+D_{\gamma}+D_{\alpha}$. A β vagy elektronsugárzás behatoló képessége az üledékekben néhány mm, ezért a homokszemcsék egészét érinti, de a szemcséken belül gyengül (MEJDAHL 1979). A γ , vagy γ foton sugárzás behatoló képessége a legnagyobb, az üledékekben több tíz cm-től 1 m-ig terjed, általában 30 cm (AITKEN 1985). A kvarc radioaktív izotóp tartalma általában elhanyagolhatóan kicsi, kivéve, ha cirkon-, apatit-, vagy K-földpát zárványokat tartalmaz, amelyek jelentős belső radioaktív sugárzást bocsátanak ki (AITKEN 1998).

A dóziszráta általában legkisebb részarányú összetevője a kozmikus sugárzás, amely a Földön kívülről származó nagyenergiájú részecskékből áll, főként protonból, aláréndelten alfa-, gamma-, és béta sugárzásból, ill. elektronból, müonból, és sokféle atommagból. A kozmikus sugárzás elektronokból álló „lágym” komponense az üledék felső 0,5 méteres részében elnyelődik, míg a főként müonokból álló „kemény” komponens lényegesen mélyebbre hatol (AITKEN 1985, 1998). A kozmikus sugárzás hatása függ a minta felszín alatti mélységétől, az üledék sűrűségétől, nedvességtartalmától, földrajzi helyzetétől (szélesség, hosszúság, tengerszint feletti magasság), és a Föld mágneses terének fluktuációja is befolyásolja (AITKEN 1985, 1998; PRESCOTT & HUTTON 1994).

Mivel a víz jelentősen gyengíti a rajta áthaladó radioaktív sugárzást, ezért a kor kiszámítása során figyelembe kell venni az üledéknek a betemetődés időtartama alatti nedvességtartalmát is (AITKEN 1998). Ennek becslése az üledék jelenlegi és telített nedvességtartalma, valamint a minta üledékes környezete, fáciése, betemetődés-története, domborzathoz és talajvízszinthez viszonyított helyzete alapján történik. Nagy szervesanyag-tartalmú üledékek esetében a dóziszráta kiszámításakor figyelembe kell venni, hogy a szerves anyagok megkötik a radioaktív izotópokat (pl. LIAN et al. 1995).

A kormeghatározáshoz használatos számítások akkor adnak helyes eredményt, ha a vizsgált üledéket azonos nagyságú dózis érte a betemetődés egész időtartama alatt, illetve ha az üledékben radioaktív bomlási egyensúly volt. A radioaktív izotópok egyensúlyának sérülését a gamma-spektrometriai mérési eredmények nyomán a radioaktív bomlási sorok jelenlegi izotóparányai alapján lehet megállapítani (pl. OLLEY et al. 1996).

A MÁFI-ban végzett OSL kormeghatározáshoz elsősorban az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet munkatársai végzik a gamma-spektrometriai méréseket a minták közvet-

len környezetéből gyűjtött üledékanyagon. Az ELGI Radiometriai Laboratóriumában a mintákat előbb kiszárítják, amennyiben szükséges megőrlik 1 mm-nél kisebb szemcseméretűre, és 600 cm^3 térfogatú Marinelli-edénybe töltik, majd légmentesen lezárják és 30 nap elteltével mérik. A spektrumot Canberra-Packard gyártmányú hordozható nagy spektrális érzékenységgű, folyékony nitrogénnel hűtött HpGe félvezető detektorral veszik fel 0–1500 keV energiatarományban. A felvételhez KFKI gyártmányú 4096 csatornás MCA kártyát használnak. A spektrumfelvétel ideje általában 60 000 másodperc. A felvett spektrumot „Sampo 90” (Canberra-Packard) program alkalmazásával értékelik ki. A kiértékelés első lépésében a spektrumok kalibrálása energia szerint történik, amihez a spektrumban a következő jól azonosítható jellegzetes energiavonalakat használják: Pb-214 (U) 351,925 keV; Bi-214 (U) 609,32 keV; Ac-228 (Th) 911,07 keV; Bi-214 (U) 1120,28 keV; K-40 1460,83 keV. Ezek alapján regresszióval kiszámítják a csatornaszám-energia összefüggést minden spektrumra, majd az egyes nuklidokhoz vagy leányelemeikhez tartozó csúcsok nettó területének kiszámítása következik: Bi-214 (U) 609,32 keV; Cs-137 661,66 keV; Tl-208 (Th) 583,19 keV; K-40 1460,83 keV. A mennyiségi meghatározást a laboratórium birtokában lévő hiteles mintasorozat segítségével, relatív mennyiségi meghatározással végzik. A hiteles anyagminták megfelelő csúcsalatti területei és a bennük lévő radioizotóp-tartalom közötti lineáris regresszió paramétereit használják az ismeretlen mintában lévő anyagmennyiség kiszámítására.

Az így megállapított radioaktív izotóp koncentrációk alapján az üledék által elnyelt béta és gamma sugárzás meghatározása ADAMIEC & AITKEN (1998) átszámítási tényezőinek segítségével történik.

Az OSL kor kiszámítása, pontossága és megbízhatósága

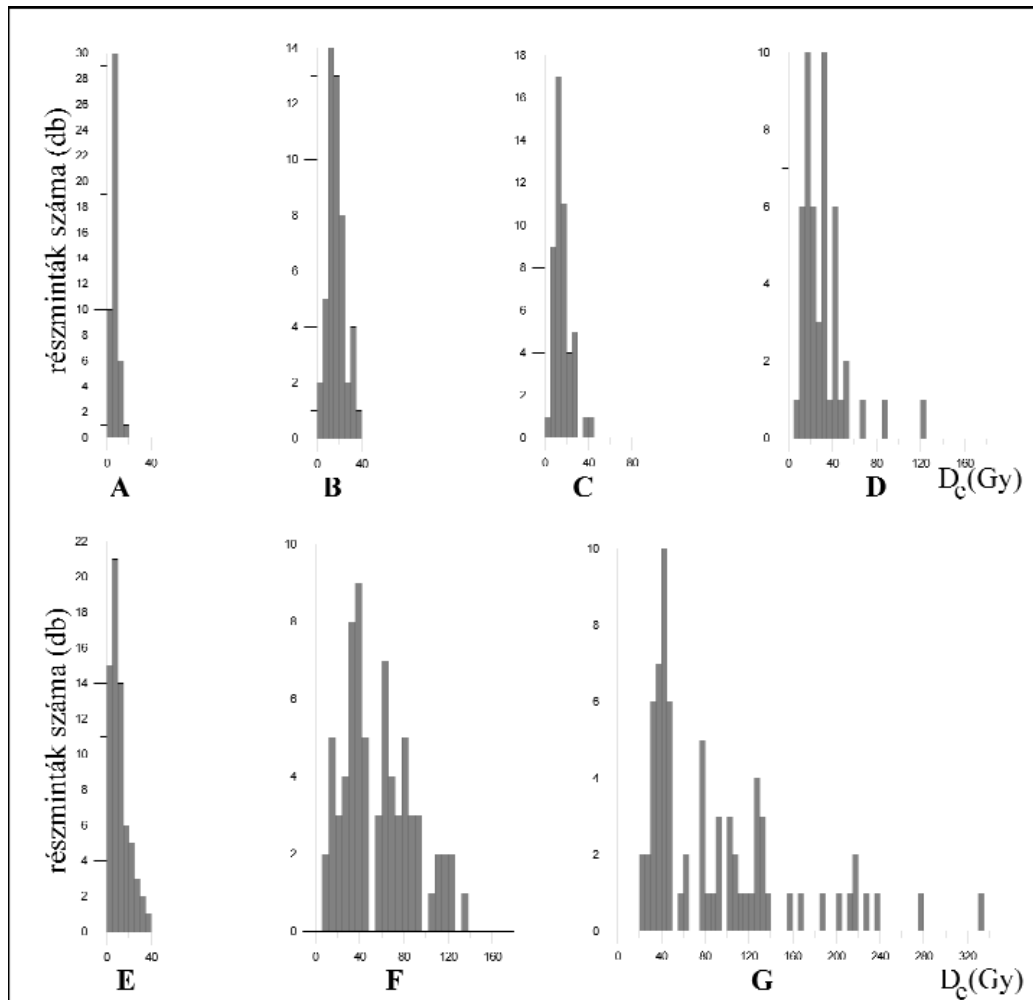
Az OSL kor kiszámításához szükséges reprezentatív egyenérték dózis (D_e) a részmintákon mért D_e értékek alapján határozható meg, figyelembe véve azok eloszlását, ami gyakorisági hisztogrammal, valószínűség sűrűség diagrammal, vagy sugárdiagrammal ábrázolható. Ideális esetben a D_e értékek eloszlása szimmetrikus és szűk határok között változik. Gyakran azonban aszimmetrikus, ferde, vagy többmaximumos az eloszlás. Ezt elsősorban az okozza, hogy az üledéket a betemetődés előtt nem érte megfelelő, vagy elegendő fény, azaz a szemcséi különböző mértékben fakultak ki, így különböző reziduális dózissal rendelkeznek. Ez főleg a vízben szállított és lerakódott üledékek esetében fordul elő, mivel a víz részben elnyeli a napfénynek a lumineszcens szignál lenullázásához legmegfelelőbb hullámhossz-tartományait. A vizsgálatok szerint azonban még a betemetődés előtt tökéletesen kifakult üledékek D_e értékei is szóródnak. Ennek az oka még nem teljesen ismert, de szerepet játszik benne a radioaktív izotópok inhomogén eloszlása az üledékanyagban (különösen a béta sugárzás

mikro-dozimetriai inhomogenitása), a részmintát alkotó szemcsék különböző lumineszcens érzékenysége, az analitikai bizonytalanságok, a lerakódás utáni üledékkeveredés (pl. ásó szervezetek hatására), és a diagenetikus folyamatok (pl. karbonát-, vagy limonitkiválás).

Ha a D_e értékek szimmetrikus eloszlásúak, akkor a számtani átlaguk alapján számítható ki a kor. Ez elsősorban a betemetődésük előtt jól kifakult eolikus üledékek esetében van így (9. ábra, A–B). Aszimmetrikus eloszlás, pl. részlegesen kifakult folyóvízi vagy lejtő üledékek esetén (9. ábra, D–G) az eloszlás alakja és statisztikus jellemzői (átlag, ferdeség, csúcosság, standard hiba, szóródás) alapján különböző számítási módszerek, modellek használata szükséges (BAILEY & ARNOLD 2006, ARNOLD et al. 2007). Így kiszámítható a centrális kor (CAM: central age model), a minimum kor (MAM: minimum age model), és a kevert kor (FMM: finite mixture model) (GALBRAITH et al. 1999), de medián D_e érték alapján (pl. TRUELSEN & WALLINGA 2003), és egyéb módon, pl. „leading edge model” (LEPPER & MCKEEVER 2002) számított korok is vannak.

Az OSL kor pontossága általában ± 5 –10%. Általában a hiba 68%-os konfidencia szinten $\pm 5\%$ alá nem vihető (AITKEN 1985). Az egyenérték dózis meghatározása során a szükséges tesztek megfelelő eredménye ellenére pontatlanságot okoz, ha az OSL kormeghatározás a nehezen kifakuló csapdák lumineszcenciáján alapul, és ha a kormeghatározás nem a D_e értékek eloszlásának megfelelő modell szerint történik. A véletlenszerű mérési hiba a részminták számának növelésével csökkenthető.

A dózistarát pontosságát, megbízhatóságát csökkenti, ha a vizsgált üledékben a lerakódás időtartama alatt megbomlott a radioaktív egyensúly, például az ^{238}U bomlásából keletkező radioaktív ^{222}Rn -gáz eldiffundált, vagy ha az oldható urán-ásványok a talajvízzel eltávoztak, illetve ha a talajvízzel radioaktív izotópok érkeztek. Az üledék ásványos inhomogenitása is csökkenti a pontosságot, amit a nagy káliumtartalmú ásványok (pl. kálföldpátok), valamint az esetleg extrém magas Th- vagy U-tartalommal rendelkező ásványok (cirkon, monacit, uraninit, apatit) egyenetlen eloszlása, helyenkénti dúsulása okoz. A kvarcsemmék radioaktív zárványai (pl. cirkon, apatit, kálföldpát) is növelik a sugárzás inhomogenitását.



9. ábra. Egyenérték dózisok eloszlása hisztogramban ábrázolva

A: dűne homok, B: lösz, C–D: lejtőüledékek, E–G: folyóvízi üledékek (hazai minták)

Figure 9. Distribution of equivalent doses in histograms

A: dune sand, B: loess, C–D: deluvial sediments, E–G: fluvial sediments (samples from Hungary)

Az üledék betemetődés alatti átlagos nedvességtartalma sem állapítható meg pontosan (RENDELL 1985). A nedvességtartalom becslésének hibája a durvaszemű módszer esetében a lumineszcens kor megadásában 7% hibát is okozhat (AITKEN 1998). A kozmikus sugárzás becslésének pontosságát csökkenti, hogy a minta betemetődés alatti mélységét nem lehet teljes bizonyossággal megállapítani. Így összességében a dózisirata hibája többnyire $\pm 10\%$.

Az OSL kor általában $\pm 5\text{--}10\%$ -os hibája, ami az idősebb minták kora esetében több ezer év bizonytalanságot is jelenthet. Ezt nagyon fontos szem előtt tartani az értelmezések során. A kapott korok ellenőrzéséhez egy-egy függőleges szelvényből legalább két mintát szükséges datálni, és ha lehetőség van rá, akkor a szelvényben más, független (pl. radiokarbon) kormeghatározási módszert is érdemes alkalmazni.

Eredmények

Az elmúlt években az Alföldről, Somogyból, a Dunántúli-középhegységből, a Dél-Dunántúlról, az Érmellékről, és néhány külföldi lelőhelyről gyűjtött folyóvízi, eolikus és lejtőüledékek betemetődési korát sikerült a MÁFI-ban meghatároznunk. A vizsgált üledékek korának kiszámításához használt legnagyobb egyenértékű dózis elérte a 193 Gy-t, a minták dózisirátája 0,6 és 2,9 Gy/ezer év között változott, a legidősebb kor 79 ± 8 ezer év volt.

Az Alföld délkeleti részén a folyóvízi üledékek OSL koradatai a folyóvízhálózat utolsó 50 ezer év során történt változásának rekonstruálásához nyújtanak segítséget, és több rétegsorban a faszénmaradványok radiokarbon kora is

alátámasztja az OSL korok helyességét (THAMÓ-BOZSÓ et al. 2007b, 2009, NÁDOR et al. 2007a–b). Az Érmellék területéről kb. 49 és 25 ezer év között képződött löszöket, valamint 9–10 ezer éves eolikus homokokat datáltunk (THAMÓ-BOZSÓ et al. 2007a). Somogyban és a Dél-Dunántúlon a folyóvízi és löszszerű üledékek, valamint egy paleotalaj-réteg betemetődési korának meghatározása az elmúlt 50 ezer év neotektonikus mozgásainak datálását is segíti (THAMÓNÉ BOZSÓ E. 2006, THAMÓ-BOZSÓ et al. 2010b). A Vértes előtereiből vizsgált folyóvízi, lejtő- és dűne üledékek 79 ± 8 és 8 ± 1 ezer év közötti koradatai a felszínfejlődés pontosabb megismerését is lehetővé teszik (THAMÓ-BOZSÓ et al. 2010a). A Bakonyban a nagyteveli kőkorszaki tűzkőbánya területén 8 és 10 ezer év körüli betemetődési korok adódtak (THAMÓ-BOZSÓ & BIRÓ 2009). Külföldön gyűjtött mintákat is vizsgáltunk (pl. SINGH et al. 2008), köztük olyan régészeti lelőhelyről is, ahol az új OSL korok jó egyezést mutattak a dendrokronológiai koradatokkal (FIEBIG et al. 2009).

Köszönetnyilvánítás

A MÁFI-ban folyó OSL kormeghatározáshoz a T-046307, T-037593, T-062478 és K-75801 OTKA kutatások nyújtottak anyagi támogatást. Köszönetünket fejezzük ki az OSL módszer elsajátításához nyújtott segítségével Andrew MURRAY professzornak (RISØ National Laboratory, Dánia), a hasznos konzultációkért Manfred FRECHEN professzornak (Geoscientific Research Institute: LIAG, Hannover), NOVOTHNY Ágnesnek (ELTE és LIAG), UJHÁZY Kolosnak (ELTE), Tobias LAUERnek (LIAG) és SIPOS Györgynek (SZTE).

Irodalom — References

- ADAMIEC, G. & AITKEN, M. 1998: Dose-rate conversion factors: update. — *Ancient TL* **16**, 37–50.
- AITKEN, M. J. 1982: *Fizika és régészet*. — Akadémiai kiadó, Budapest, 260 p.
- AITKEN, M. J. 1985: *Thermoluminescence Dating*. — Academic Press, London, 359 p.
- AITKEN, M. J. 1998: *An Introduction to Optical Dating. The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-stimulated Luminescence*. — Oxford University Press, 280 p.
- AITKEN, M. J., TITE, M. S. & REID, J. 1964: Thermoluminescent Dating of Ancient Ceramics. — *Nature* **202**, 1032–1033.
- AITKEN, M. J., ZIMMERMAN, D. W. & FLEMING, S. J. 1968: Thermoluminescent Dating of Ancient Pottery. — *Nature* **219**, 442–445.
- ARNOLD, L. J., BAILEY, R. M., & TUCKER, G. E. 2007: Statistical treatment of fluvial dose distributions from southern Colorado arroyo deposits. — *Quaternary Geochronology* **2**, 162–167.
- BAILEY, R. M. 2001: Towards a general kinetic model for optically and thermally stimulated luminescence of quartz. — *Radiation Measurements* **33**, 17–45.
- BAILEY, R. M. & ARNOLD, L. J. 2006: Statistical modelling of single grain quartz D_e distributions and an assessment of procedures for estimating burial dose. — *Quaternary Science Reviews* **25**, 2475–2502.
- BAILEY, R. M., SMITH, B. W. & RHODES, E. J. 1997: Partial bleaching and the decay form characteristics of quartz OSL. — *Radiation Measurements* **27**, 123–136.
- BANERJEE, D., MURRAY, A. S., BØTTER-JENSEN, L. & LANG, A. 2001: Equivalent dose estimation using a single aliquot of polymineral fine grains. — *Radiation Measurements* **33**, 73–93.
- BENKÓ, L., HORVÁTH, F., HORVATINCIC, N. & OBELIC, B. 1989: Radiocarbon and thermoluminescence dating of prehistoric sites in Hungary and Yugoslavia. — *Radiocarbon* **31**, 992–1002.

- BORSY, Z., FÉSZERFALVI, J. & SZABÓ, P. P. 1979: Thermoluminescence dating of several layers of the loess sequence at Paks and Mende (Hungary). — *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **1979**, 451–459.
- BØTTER-JENSEN, L., DULLER, G. A. T., MURRAY, A. S. & BANERJEE, D. 1999: Blue light emitting diodes for optical stimulation of quartz in retrospective dosimetry and dating. — *Radiation Protection Dosimetry* **84**, 335–340.
- BØTTER-JENSEN, L., BULUR, E., DULLER, G. A. T. & MURRAY, A. S. 2000: Advances in luminescence instrument systems. — *Radiation Measurements* **32**, 523–528.
- BØTTER-JENSEN, L., ANDERSEN, C. E., DULLER, G. A. T. & MURRAY, A. S. 2003a: Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements. — *Radiation Measurements* **37**, 535–541.
- BØTTER-JENSEN, L., MCKEEVER, S. W. S. & WINTLE, A. G. 2003b: *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*. — Elsevier, Amsterdam, 374 p.
- BUTRYM, J. & MARUSZCZAK, H. 1984: Paks Thermoluminescence chronology of younger and older loesses. — In: PÉCSI, M. (ed.), *Lithology and stratigraphy of loess and paleosols*. — Geographical Research Institute. Hungarian Academy of Science, Budapest, 196–198.
- DENBY, P. M., BØTTER-JENSEN, L., MURRAY, A. S., THOMSEN, K. J. & MOSKA, P. 2006: Application of pulsed OSL to the separation of the luminescence components from a mixed quartz/feldspar sample. — *Radiation Measurements* **41**, 774–779.
- DULLER, G. A. T. 2004: Luminescence dating of Quaternary sediments: recent developments. — *Journal of Quaternary Science* **19**, 183–192.
- DULLER, G. A. T., LI, S. H., MUSSON, F. M. & WINTLE, A. G. 1992: Use of infrared stimulated luminescence signal for scanning sediment cores. — *Quaternary Science Reviews* **11**, 115–119.
- DULLER, G. A. T., BØTTER-JENSEN, L., MURRAY, A. S. & TRUSCOTT, A. J. 1999: Single grain laser luminescence (SGLL) measurements using a novel automated reader. — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* **155**, 506–514.
- FIEBIG, M., PREUSSER, F., STEFFEN, D., THAMÓ-BOZSÓ, E., GRABNER, M., LAIR, G. J. & GERZABEK, M. H. 2009: Luminescence dating of historical fluvial deposits from the River Danube and Ebro. — *Geoarchaeology* **24**, 224–241.
- FRECHEN, M., HORVÁTH, E. & GÁBRIS, Gy. 1997: Geochronology of Middle and Upper Pleistocene loess sections in Hungary. — *Quaternary Research* **48**, 291–312.
- GALBRAITH, R. F., ROBERTS, R. G., LASLETT, G. M., YOSHIDA, H. & OLLEY, J. M. 1999: Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: part I, experimental design and statistical models. — *Archaeometry* **41**, 339–364.
- GOROBETS, B. S. & ROGOJINE, A. A. 2002: *Luminescent spectra of minerals*. — All-Russia Institute of Mineral Resources. (VIMS), Moscow, 300 p.
- GRÜN, R. & STRINGER, C. B. 1991: Electron spin resonance dating and the evolution of modern humans. — *Archaeometry* **33**, 153–199.
- HUNTLEY, D. J. 1985: On the Zeroing of the Thermoluminescence of Sediments. — *Physics and Chemistry of Minerals* **12**, 122–127.
- HUNTLEY, D. J., GODFREY-SMITH, D. I. & THEWALT, M. L. W. 1985: Optical Dating of Sediments. — *Nature* **313**, 105–107.
- HUNTLEY, D. J., SHORT, M. A. & DUNPHY, K. 1996: Deep traps in quartz and their use for optical dating. — *Canadian Journal of Physics* **74**, 81–91.
- JAIN, M., MURRAY, A. S. & BØTTER-JENSEN, L. 2004: Optically stimulated luminescence dating. How significant is incomplete light exposure in fluvial environments? — *Quaternaire* **15**, 143–157.
- JERLOV, N. G. 1976: *Marine optics*. — Elsevier, Amsterdam, 231 p.
- KUHNS, C. K., AGERSNAP LARSEN, N. & MCKEEVER, S. W. S. 2000: Characteristics from several different types of quartz. — *Radiation Measurements* **32**, 413–418.
- LEPPER, K. & MCKEEVER, W. S. 2002: An objective methodology for dose distribution analysis. — *Radiation Protection Dosimetry* **101**, 349–352.
- LI, S.-H. & WINTLE, A. G. 1994: Use of infra-red stimulated signals from pellets of compressed loess from Rocourt, Belgium. — *Quaternary Science Reviews* **13**, 519–532.
- LIAN, O. B., HU, J., HUNTLEY, D. J. & HICOCK, S. R. 1995: Optical dating studies of Quaternary organic-rich sediments from southwestern British Columbia and northwestern Washington State. — *Canadian Journal of Earth Sciences* **32**, 1194–1207.
- MAUZ, B. & LANG, A. 2004: Removal of the feldspar-derived luminescence component from polymineral fine silt samples for optical dating applications: evaluation of chemical treatment protocols and quality control procedures. — *Ancient TL* **22**, 1–8.
- MEJDAHL, V. 1979: Thermoluminescence dating: dose attenuation in quartz grains. — *Archaeometry* **21**, 61–72.
- MURRAY, A. S. & OLLEY, J. M. 2002: Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz. — *Geochronometria* **21**, 1–16.
- MURRAY, A. S. & ROBERTS, R. G. 1998: Measurement of the equivalent dose in quartz using a regenerative-dose single-aliquot protocol. — *Radiation Measurements* **29**, 503–515.
- MURRAY, A. S. & WINTLE, A. G. 2000: Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. — *Radiation Measurements* **32**, 57–73.
- MURRAY, A. S. & WINTLE, A. G. 2003: The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. — *Radiation Measurements* **37**, 377–381.
- MURRAY, A. S., OLLEY, J. M. & CAITCHEON, G. G. 1995: Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence. — *Quaternary Science Reviews* **14**, 365–371.
- NÁDOR, A., THAMÓ-BOZSÓ, E., MAGYARI, Á. & BABINSZKI, E. 2007a: Fluvial responses to tectonics and climate change during the Late Weichselian in the eastern part of the Pannonian basin (Hungary). — *Sedimentary Geology* **202**, 174–192.
- NÁDOR, A., THAMÓ-BOZSÓ, E., MAGYARI, Á., BABINSZKI, E., DUDKO, A. & TÓTH, Z. 2007b: Klímaváltozás és neotektonika együttes hatása a Berettyó-Körös medence késő-pleisztocén–holocén vízhálózat-fejlődésében. — *MÁFI Évi Jelentése* **2005**, 131–148.

- NOVOTHNY Á. & UJHÁZY K. 2000: A termo- és optikai lumineszcens kormeghatározás elméleti alapjai és gyakorlati kérdései a negyedidőszaki kutatásokban. — *Földrajzi Értesítő* **49/3–4**, 165–187.
- NOVOTHNY, Á., HORVÁTH, E. & FRECHEN, M. 2002: The loess profile at Albertirsa, Hungary — improvements in loess stratigraphy by luminescence dating. — *Quaternary International* **95–96**, 155–163.
- NOVOTHNY, Á., FRECHEN, M., HORVÁTH, E., BRADÁK, B., OCHES, E. A., MCCOY, W. D. & STEVENS, T. 2009: Luminescence and amino acid racemization chronology of the loess–paleosol sequence at Süttő, Hungary. — *Quaternary International* **198**, 62–76.
- NOVOTHNY Á., FRECHEN, M., HORVÁTH, E., KRBETSCHKEK, M., & TSUKAMOTO, S. 2010: Infrared stimulated luminescence and radiofluorescence dating of aeolian sediments from Hungary. — *Quaternary Geochronology* **5/2–3**, 114–119.
- NYÁRI, D., KISS, T. & SIPOS, Gy. 2007: Investigation of Holocene blown-sand movement based on archaeological findings and OSL dating, Danube–Tisza Interfluve, Hungary. — *Journal of Maps Student Edition (2007)*, 46–57.
- OLLEY, J. M., MURRAY, A. S. & ROBERTS, R. G. 1996: The effects of disequilibria in the uranium and thorium decay chains on burial dose rates in fluvial sediments. — *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)* **15**, 751–760.
- PÉCSI, M., HELLER, F., SCHWEITZER, F., BALOGH, J., BALOGH, M. & HAVAS, J. 1995: A new loess–paleosol sequence of Paks in Hungary. — *Loess in Form* **3**, Budapest, Geographical Research Institute, Hungarian Academy of Science, 63–79.
- POOLTON, N. R. J., BØTTER-JENSEN, L., WINTLE, A. G., YPMA, P. J., KNUDSEN, K. L., MEJDAHL, V., MAUNZ, B., CHRISTIANSEN, H. E., JAKOBSEN, J., JØRGENSEN, F. & WILLUMSEN, F. 1996: A scanning system for measuring the age-related luminescence of split sediment cores. — *Boreas* **25**, 195–208.
- POOLTON, N. R. J., BULUR, E., WALLINGA, J., BØTTER-JENSEN, L., MURRAY, A. S. & WILLUMSEN, F. 2001: An automated system for the analysis of variable temperature radioluminescence. — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* **179**, 575–584.
- PRESCOTT, J. R. & HUTTON, J. T. 1994: Cosmic ray contribution to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. — *Radiation Measurements* **23**, 497–500.
- RENDELL, H. M. 1985: The precision of water content estimates in the thermoluminescence dating of loess from northern Pakistan. — *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* **10**, 763–768.
- RENDELL, H. M., WEBSTER, S. E. & SHEFFER, N. L. 1994: Underwater bleaching of signals from sediment grains: new experimental data. — *Quaternary Geochronology (Quaternary Science Reviews)* **13**, 433–435.
- SCHWARZ, H. P., GRÜN, R., VANDERMEERSCH, B., BAR-YOSEF, O., VALLADA, H. & TCHERNOV, E. 1988: ESR dates for the hominid burial site of Qafzeh in Israel. — *Journal of Human Evolution* **17**, 733–737.
- SHELKOPLYAS, V. N. & MOZOROV, G. V. 1965: Some results of an investigation of Quaternary deposits by the thermoluminescence method. — In: *Materials on the Quaternary period of the Ukraine for the VIIth International Quaternary Association Congress, Naukova, Dumka, Kiev*, 83–90.
- SINGH, VIMAL, TANDON, S. K., SINGH, VAIBHAVA, MUKUL, M. & THAMÓ-BOZSÓ, E. 2008: Geometry and development of the Jhajara thrust: An example of neotectonic activity in the Pinjaur Dun, NW Himalaya. — *Current Science* **94**, 623–628.
- SIPOS Gy, KISS T. & NYÁRI D. 2009: Kormeghatározás optikai lumineszcenciával: homokmozgások vizsgálata a történelmi időkben Csengele területén. — In: KÁZMÉR M. (szerk.): *Környezettörténet 2006*. Hantken Kiadó, Budapest, 409–420.
- STEFFEN, D., PREUSSER, F., SCHLUNEGGER, F. 2009: OSL quartz age underestimation due to unstable signal components. — *Quaternary Geochronology* **4**, 353–362.
- STOKES S., BRAY, H. E. & BLUM, M. D. 2001: Optical resetting in large drainage basins; tests of zeroing assumptions using single-aliquot procedures. — *Quaternary Science Reviews* **22**, 879–885.
- THAMÓNÉ BOZSÓ E. 2006: Az atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló programhoz tartozó minták fotolumineszcens (OSL) kormeghatározása (Mórág, Bataapáti, Üveghuta). — Kézirat, MÁFI, Budapest, 34 p.
- THAMÓ-BOZSÓ, E. & BIRO, T. K. 2009: Optically stimulated luminescence dating of sediments on archaeological sites. — *MinPet2009 & 4th Mineral Sciences in the Carpathians Conference and Eötvös Workshops in Science meeting*, Budapest, 2009. szeptember 7–11. *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft* **155**, p. 160.
- THAMÓ-BOZSÓ, E., MAGYARI, Á., NAGY, A., UNGER, Z. & KERCSMÁR, Zs. 2007a: OSL dating and heavy mineral analysis of Upper Quaternary sediments in the valleys of Ér- and Berettyó rivers. — *Geochronometria* **28**, 17–23.
- THAMÓ-BOZSÓ, E., MURRAY, A. S., NÁDOR, A., MAGYARI, Á. & BABINSZKI, E. 2007b: Investigation of river network evolution using luminescence dating and heavy mineral analysis of Late Quaternary fluvial sands from the Great Hungarian Plain. — *Quaternary Geochronology* **2**, 168–173.
- THAMÓNÉ BOZSÓ E., NÁDOR A. & MAGYARI Á. 2009: A lumineszcens kormeghatározás alkalmazása a történelmi idők környezeti eseményeinek datálására. — In: KÁZMÉR M. (szerk.): *Környezettörténet 2006*. Hantken Kiadó, Budapest, 399–407.
- THAMÓ-BOZSÓ, E., CSILLAG, G., FODOR, L., MÜLLER, P. & NAGY, A. 2010a: OSL age data to Quaternary landscape evolution in the forelands of Vértes Hills (Hungary). — *Quaternary Geochronology* **5/2–3**, 120–124.
- THAMÓ-BOZSÓ, E., MAGYARI, Á. & MUSITZ, B. 2010b: OSL ages and origin of Late Quaternary sediments in the North Transdanubian Hills (Hungary): timing of neotectonic activity. — *Quaternary International* **222**, 209–220.
- TRUENSEN, J. L. & WALLINGA, J. 2003: Zeroing of the OSL signal as a function of grain size: investigating bleaching and thermal transfer for a young fluvial sample. — *Geochronometria* **22**, 1–8.
- TSUKAMOTO, S., DULLER, G. A. T. & WINTLE, A. G. 2008: Characteristics of thermally transferred optically stimulated luminescence (TT-OSL) in quartz and its potential for dating sediments. — *Radiation Measurements* **43**, 1204–1218.
- UJHÁZY K. 2002: A dunavarsányi garmadabucka fejlődéstörténete radiometrikus kormeghatározások alapján. — *Földtani Közlemények* **132/különszám**, 175–184.

- UJHÁZY, K., GÁBRIS, Gy. & FRECHEN, M. 2003: Ages of periods of sand movement in Hungary determined through luminescence measurements. — *Quaternary International* **111**, 91–100.
- WALLINGA, J. 2002: Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: a review. — *Boreas* **31**, 303–322.
- WATANUKI, T., MURRAY, A. S. & TSUKAMOTO, S. 2003: A comparison of OSL ages derived from silt-sized quartz and polymineral grains from Chinese loess. — *Quaternary Science Reviews* **22**, 991–997.
- WINTLE, A. G. 1997: Laboratory protocols and procedures for luminescence dating. — *Radiation Measurements* **27**, 769–817.
- WINTLE, A. G. & HUNTLEY, D. J. 1979: Thermoluminescence dating of a deep-sea sediment core. — *Nature* **279**, 710–712.
- WINTLE, A. G. & MURRAY, A. S. 2006: A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. — *Radiation Measurements* **41**, 369–391.
- WINTLE, A. G. & PACKMAN, S. C. 1988: Thermoluminescence ages for three sections in Hungary. — *Quaternary Science Reviews* **7**, 315–320.
- ZÖLLER, L. & WAGNER, G. A. 1990: Thermoluminescence dating of loess — recent developments. — *Quaternary International* **7/8**, 119–128.
- ZÖLLER, L., OCHES, E. A. & MCCOY, W. D. 1994: Towards a revised chronostratigraphy of loess in Austria with respect to key sections in the Czech Republic and in Hungary. — *Quaternary Geochronology (Quaternary Science Reviews)* **13**, 465–472.

Kézirat beérkezett: 2010. 06. 16.