

LUMINESCENCYJNE DATOWANIA W BADANIACH GEOARCHEOLOGICZNYCH

Luminescent dating in ge archaeological research

Tomasz Kalicki, Wojciech Głuszewski,
Marcin Frączek, Paweł Przepióra

Streszczenie: W artykule omówiono wyniki kilku interdyscyplinarnych geologicznych datowań wykonanych metodami optycznymi. Wiek starszych osadów, głównie plejstocenijskich określono za pomocą termoluminescencji (TL). Młodsze holocenijskie osady datowano z wykorzystaniem optycznie stymulowanej luminescencji (OSL). Na przykładzie osadów mineralnych zawierających kwarc wyjaśniono podstawy obu technik datowania. Często są one stosowane naprzemiennie, w zależności od materiału i jego szacowanego wieku. Metoda OSL rekomendowana jest do badania próbek na stanowiskach archeologicznych. W obu technikach analitycznych mierzy się wielkości dawek pochłoniętych naturalnego promieniowania jonizującego. Zwrócono uwagę na znaczenie laboratoryjnych źródeł promieniowania gamma w wyznaczaniu krzywych kalibracji.

Abstract: The article discusses the results of several interdisciplinary studies on the dating of geological sediments with optical methods. The age of older sediments, mainly Pleistocene ones, was determined by thermoluminescence (TL). Younger Holocene sediments were dated using optically stimulated luminescence (OSL). The basics of both methods of dating sediments containing quartz are explained. The OSL method is successfully used to determine the age of mineral sediment in archaeological sites. The basis of both analytical techniques is the measurement of the amount of absorbed doses of natural ionizing radiation. Also the importance of laboratory gamma radiation sources used for the determination of calibration curves has been emphasized.

Słowa kluczowe: luminescencja, datowanie, termoluminescencja, optycznie stymulowana luminescencja, geologia, archeologia

Keywords: luminescence, dating, thermoluminescence, optically stimulated luminescence, geology, archaeology

Wstęp

Termoluminescencja (TL) lub termicznie stymulowana luminescencja (TSL) to zjawisko występujące w substancjach o bardzo wysokim oporze elektrycznym, czyli dielektrykach i półprzewodnikach. W materiałach tego typu pasma przewodnictwa są oddzielone od pasm walencyjnych przerwą energetyczną. Krystaliczne materiały zawierają niedoskonałości: jony zanieczyszczeń, atomy międzywęzłowe, dyslokacje, uskoki sieci i inne zjawiska, które zakłócają regularność pola elektrycznego utrzymującego atomy w sieci. Defekty prowadzą do lokalnych wzrostów i spadków potencjału elektrycznego. Tam, gdzie występuje głęboka studnia potencjału wolny elektron może zostać przyciągnięty i uwięziony na bardzo długi okres czasu. Defekty oprócz luminescencji odpowiadają za inne właściwości kryształów, między innymi półprzewodnictwo typu n lub p oraz barwę.

Tak więc w miejscach zaburzeń sieci krystalicznej obszaru zabronionego powstają pułapki: elektronowe bliskie pasmu przewodnictwa oraz dziurowe bliskie pasmu walencyjnemu. Do wystąpienia termoluminescencji niezbędne jest przeniesienie elektronów i dziur do pułapek (ekscytacja). Najczęściej jest to wynikiem wybicia elektronów z pasma walencyjnego do pasma

przewodnictwa (generacja par dziura-elektron). Nie-wielka część elektronów z pasma przewodnictwa może przejść do pułapek elektronowych. Pewna ilość dziur przechodzi też do pułapek dziurowych. Ekscytację materiału może spowodować promieniowanie o energii większej od szerokości przerwy energetycznej materiału. Dielektryki nieorganiczne są zazwyczaj ekscytowane wysokoenergetycznym promieniowaniem jonizującym (rentgenowskim, hamowania, gamma, alfa, beta lub wiązką elektronów).

Do uwolnienia spułapkowanych elektronów potrzebne jest promieniowanie o energii, co najmniej równej różnicy między poziomem pułapki a pasmem przewodnictwa. Aby materiał mógł być wykorzystany, jako dozymetr różnica ta musi być większa od energii promieniowania cieplnego w temperaturze pokojowej, a mniejsza od energii promieniowania cieplnego w temperaturze kilkuset stopni. W wyniku podgrzania elektrony z pułapek zostają przeniesione do pasma przewodnictwa, z którego rekombinują do centrów zawierających pułapkowane nośniki przeciwnego znaku. Towarzyszy temu emisja promieniowania elektromagnetycznego. Natężenie świecenia jest zazwyczaj proporcjonalne do liczby elektronów uwięzionych w pułapkach, czyli do dawki pochłoniętej promieniowania podczas ekscytacji. Podgrzanie materiału lub naświet-

tlenie np. światłem słonecznym usuwa elektrony (dziury) z pułapek zerując pamięć dozymetryczną kryształu.

Metoda termoluminescencyjna (TL) służy do określania wieku osadów czwartorzędowych [1][2] i jest powszechnie stosowana w naukach przyrodniczych (Nauki o Ziemi i środowisku). Znajduje również zastosowanie do określania wieku artefaktów w archeologii [3] [4]. Datowanie optycznie stymulowaną luminescencją (OSL), wykorzystuje do wyświecania światło, zamiast podwyższonej temperatury. Często datowanie TL i OSL wykonuje się naprzemiennie w celu weryfikacji uzyskanych wyników.

Naturalne promieniowanie jonizujące

Nośniki ładunku (dziury i elektrony), uwięzione w pułapkach sieci krystalicznej nawet przez setki tysięcy lat, wykorzystuje się w archeologii i geologii do datowania materiałów. Naturalnymi źródłami promieniowania jonizującego powodującymi ekscytację, np. krzemianów są radionuklidy znajdujące się w ziemi oraz promieniowanie kosmiczne. W skorupie ziemskiej obecnych jest nadal 18 długo żyjących pierwiastków promieniotwórczych o okresie półtrwania zbliżonym do wieku Ziemi (rzędu miliardów lat). Trzy szeregi promieniotwórcze są źródłem dodatkowych 43 innych radioizotopów. Wszystkich tych promieniotwórczych izotopów oczywiście stale ubywa. Średnie aktywności poszczególnych radioizotopów są szacowane następująco: ^{232}Th – $4,06 \cdot 10^6$ Bq/kg, ^{238}U – $1,24 \cdot 10^7$ Bq/kg, ^{40}K – $2,58 \cdot 10^8$ Bq/kg. Inaczej mówiąc w kilogramie gleby następuje w ciągu sekundy około 770 rozpadów promieniotwórczych potasu ^{40}K , 37 rozpadów ^{238}U oraz 41 rozpadów ^{232}Th . ^{40}K ulega wszystkim trzem przemianom beta (β^- , β^+ , wychwyty elektronu), czemu towarzyszy emisja promieniowania gamma w 11% rozpadów. W przypadku pozostałych pierwiastków źródłem promieniowania gamma są pochodne rozpadu. Przyjmuje się, że w jednym kilogramie gleby w ciągu sekundy powstaje około 85 kwantów gamma z potasu ^{40}K , około 102 z pochodnych w szeregu torowego i około 133 z szeregu uranowo-radowego. Jeżeli człowiek położy się na ziemi to jego ciało otrzyma około 7000 kwantów gamma na sekundę pochodzących z rozpadu ^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th .

W materiałach krystalicznych (niektórych amorficznych) część energii promieniowania jest w wyniku wybicia elektronów zmagazynowana w sieci krystalicznej. Ponieważ czasy połowicznego zaniku radionuklidów decydujących o aktywności promieniotwórczej środowiska są rzędu miliardów lat to można przyjąć, że ilość izotopów promieniotwórczych jest stała nawet w geologicznej skali czasu. Przy takim założeniu dawka promieniowania pochłonięta przez badany obiekt jest proporcjonalna do czasu jego przebywania w określonym środowisku.

Przykładem jest datowanie TL/OSL kwarcu i niektórych skaleni, w których dawki pochłonięte promieniowania są liczone w miligrejach na rok (mGy/rok) lub w grejach na tysiąc lat (Gy/ka). Osad zbudowany z ziarenek kwarcu, które były wyeksponowane na działanie promieniowania słonecznego przykrywany jest z czasem przez kolejne warstwy nanoszonego materiału. Przerzywane jest tym samym zerowanie dozymetryczne i od tego momentu kwarc jedynie magazynuje energię promieniowania jonizującego. Ponowne „wyświecenie” pozwala ustalić czas, jaki upłynął od pierwotnego wyzerowania. W wypalanej ceramice lub używanej na paleniskach przez człowieka prehistorycznego, ziarna kwarcu zerowane były wysoką temperaturą. W przypadku datowania OSL, kwarc przechodzi nieco inną procedurę czyszczenia, która ma na celu pobudzenie procesu luminescencji przy użyciu światła [1].

Źródła promieniowania gamma

W celu wyznaczenia krzywej kalibracji próbek kwarcu poddawano działaniu określonych dawek promieniowania gamma. Przy źródłach promieniowania o dużej mocy np. 10 kGy/h może powstać problem z uzyskaniem stosunkowo małych dawek „geologicznych”. Przy 10 Gy czas napromieniowania jest rzędu 3,6 s. W obliczeniach należy uwzględnić również tzw. dawkę przelotową, którą otrzyma materiał nim znajdzie się we właściwym punkcie urządzenia. To dodatkowo skraca czas napromieniowania. W źródle GC 5000 (fot. 1) którym dysponuje Instytut Chemii i Techniki Jądrowej możliwe jest zastosowanie stalowych pojemników (osłon), które zmniejszają dawkę odpowiednio 2 i 4 razy. Instytut ma również źródło promieniowania typu Isledovatel o mocy dawki dziesięć razy mniejszej (obecnie 0,2 kGy/h) (fot.1 na drugim planie). Kontrolę dawki i jej rozkładu dokonuje działające w ramach IChTJ akredytowane Laboratorium Pomiarów Dawek Technologicznych. LPDT gwarantuje spójność pomiarów dozymetrycznych z pierwotnym wzorcem dawki pochłoniętej brytyjskiego laboratorium metrologicznego National Physical Laboratory, Teddington.

Laboratoryjnymi źródłami promieniowania gamma są najczęściej urządzenia z radioaktywnymi izotopami kobaltu i cezu. Dla formalności należy wyjaśnić, że ^{60}Co jest β promieniotwórczy. Praktyczne znaczenie ma natomiast promieniowanie elektromagnetyczne (γ) emitowane przez nietrwały produkt jego rozpadu, wzbudzone jądra $^{60}\text{Ni}^*$. Sporadycznie stosuje się również ^{137}Cs , który występuje w równowadze promieniotwórczej ze swoim produktem rozpadu, $^{137}\text{Ba}^*$. Emitują one promieniowania beta o energii 0,512 MeV i gamma o energii o 0,662 MeV. Ograniczenia w wykorzystaniu ^{137}Cs wynikają z łatwej rozpuszczalności soli tego pierwiastka, co stwarza potencjalne zagrożenie w przypad-



Fot. 1. Laboracyjne źródła promieniowania gamma w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Na pierwszym planie GC 5000 (moc dawki 2,20 kGy/h, listopad 2020). Na drugim planie Isledovatel (moc dawki 0,21 kGy/h, listopad 2020; fot. W. Głuszewski)

Photo. 1. Laboratory sources of gamma radiation at the Institute of Nuclear Chemistry and Technology in Warsaw. In the foreground, the GC 5000 (dose rate 2.20 kGy/h, November 2020). Isledovatel in the background (dose rate 0.21 kGy/h, November 2020; photo by W. Głuszewski)

ku zawilgocenia instalacji albo dostania się związków cezu w niepowołane ręce.

Datowania TL i OSL

Przy zastosowaniu TL i OSL wymagana jest szczególna ostrożność w czasie pobierania próbek. Nie mogą być one wystawione na działanie światła lub wysokiej temperatury, co mogłoby doprowadzić do niepożądanego wyzerowania. Próbkę należy przechowywać i suszyć w ciemnych pomieszczeniach lub suszarkach w optymalnej temperaturze. Materiał ceramiczny zaleca się przechowywać w folii aluminiowej w celu uniknięcia pochłonięcia dodatkowego promieniowania.

Zarówno w przypadkach datowania artefaktów, jak i próbek geologicznych konieczne jest ustalenie tzw. rocznej dawki promieniowania tła. Określa się ją na podstawie pomiarów stężeń radioizotopów potasu (^{40}K), radu (^{226}Ra) i toru (^{228}Th) obecnych w analizowanym materiale lub osadach, w których zalegał badany obiekt historyczny [3].

Metoda termoluminescencyjna (TL) została opracowana i wykorzystana do badań po raz pierwszy na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX w. Początkowo przedmiotem zainteresowań były możliwości zastosowania tej techniki w archeologii oraz szeroko rozumiane kwestie metodologiczne. Prowadzono również liczne badania nad ceramiką pradziejową, w tym testy autentyczności wyrobów glinianych z różnych okresów chronologicznych. Obecnie zastosowania tej metody daleko wykraczają poza analizę materiałów ceramicznych. W ostatnim ćwierćwieczu TL wielokrotnie wykorzystywano do datowania osadów eolicznych (piasków wydmowych i lessów), jak również innych osadów pylastych, a także przepalonych krzemieni. W przypadku badań prowadzonych przez polskich badaczy, zastosowania TL najczęściej dotyczą pogranicza archeologii i geologii, często w odniesieniu do osadów plejstocenyjskich [5]. Ze względu na specyfikę zjawiska termoluminescencji teoretyczny zakres wiekowy jest ograniczony do ostatniego miliona lat ale najczęściej dotyczy przedziału od kilkuset do 100–200

tys. lat [6]. Jak było wspomniane TL może być wykorzystywana do datowania zabytków archeologicznych: ceramiki, cegieł, fragmentów glinianych pieców i polep, a także wypalonych krzemieni [6].

Termoluminescencyjnie określony wiek osadów jest ilorazem dwóch wielkości: dawki równoważnej (ED – equivalent dose) i dawki rocznej (DR – dose rate). Ta ostatnia pełni rolę podstawowej jednostki czasu i określa jaką ilość energii promieniowania jonizującego pochłonął datowany obiekt w ciągu roku lub tysiąclecia. Przyjmuje się założenie, że DR była stała w ciągu całego okresu, jaki upłynął od depozycji osadu [6].

W przypadku datowania TL na pierwszym etapie preparacji wysuszony materiał należy przesiać przez zestaw sit (fot. 2) w celu odseparowania frakcji poliminerальной o średnicy poniżej 63 μm . Dla datowania metodą OSL stosuje się dwa przedziały uziarnienia (125-71 μm) oraz (200-125 μm). Przy datowaniu metodą *single grain* używa się również frakcji (315-200 μm).

W przypadku ceramiki należy delikatnie zeszlifować zewnętrzną warstwę (ok 1-1,5 mm). Materiał wewnątrz skorupy poddawany był w mniejszym stopniu procesom post depozycyjnym, w tym naświetlaniu i podgrzaniu, przez co jest najbardziej reprezentatywny w datowaniu zabytku. Podobna procedura stosowana jest w datowaniach cegieł lub polep. Oczyszczone fragmenty materiału są kruszone i przygotowane do obróbki chemicznej podobnej jak materiał geologiczny.

Wstępne czyszczenie próbki odbywa się w myjkach ultradźwiękowych, w których oddziela się zanieczyszczenia od materiału mineralnego. W zależności od metody i stosowanej aparatury, próbki przeznaczone do datowania OSL trawione są w 10% roztworze kwasu solnego (HCl) i 40% roztworze kwasu fluorowodorowego (HF). Płukanie wodą destylowaną odbywa się w warunkach przytłumionego czerwonego światła. Przy datowaniu OSL próbka poddawana jest grawitacyjnej separacji przy użyciu różnej gęstości płynu w przedziałach 2,62–2,68 g/cm^3 oraz $<2,58 \text{ g}/\text{cm}^3$. Kolejnym krokiem jest suszenie i „zerowanie” materiału. W przypadku osadów geologicznych proces ten odbywa się przy użyciu lampy emitującej światło UV i trwa około 24 h. Część materiału nie jest naświetlana i pozostaje jako próbka „naturalna”. Pozostała część, po naświetleniu zostaje odseparowana, jako próbka „zerowa”, co jest punktem odniesienia do dalszych analiz.

Dla zabytków archeologicznych wzbudzonych termicznie wykorzystuje się piec muflowy, a samo „zerowanie” przebiega w temperaturze 550°C i trwa 1,5 h. Wyzerowane optycznie lub termicznie próbki są następnie dzielone na porcje i napromieniowane dawkami promieniowania gamma odpowiednimi do szacowanego wieku. Dla osadów schyłkowo plejstoceniowych stosuje się dawki rzędu 100-300 Gy/ka, a dla późnoglacialnych i holoceniowych 5-20 Gy/ka.



Fot. 2. Wyposażenie Zespołu Laboratoriów Geomorfologiczno-Hydrologicznych w Instytucie Geografii i Nauk o Środowisku Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach. Na zdjęciu (od lewej) widoczny zestaw sit i przesiewacze firmy „Multiserw-Morek” LpzE-2e oraz „Retsch – Rahmen” (z prawej; fot. P. Przepióra)

Photo 2. Equipment of the Geomorphological and Hydrological Laboratory Complex at the Institute of Geography and Environmental Sciences of the Jan Kochanowski University in Kielce. The photo (from the left) shows a set of sieves and shakers of “Multiserw-Morek” LpzE-2e and “Retsch – Rahmen” (right; photo by P. Przepióra)



Fot. 3. Wyposażenie Zespołu Laboratoriów Geomorfologiczno-Hydrologicznych w Instytucie Geografii i Nauk o Środowisku Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach. Czytelniki TL oraz OSL „Laboratory Reader-Analyser RA'04” (górze), mierniki stężenia pierwiastków promieniotwórczych „MAZAR-01” (dół) oraz kolumna pomiarowa (z prawej; fot. P. Przepióra)

Photo. 3. Equipment of the Geomorphological and Hydrological Laboratory Complex at the Institute of Geography and Environmental Sciences of the Jan Kochanowski University in Kielce. TL and OSL readers “Laboratory Reader-Analyser RA'04” (top), counter for the concentration of radioactive elements “MAZAR-01” (bottom) and a measuring column (right; photo by P. Przepióra)

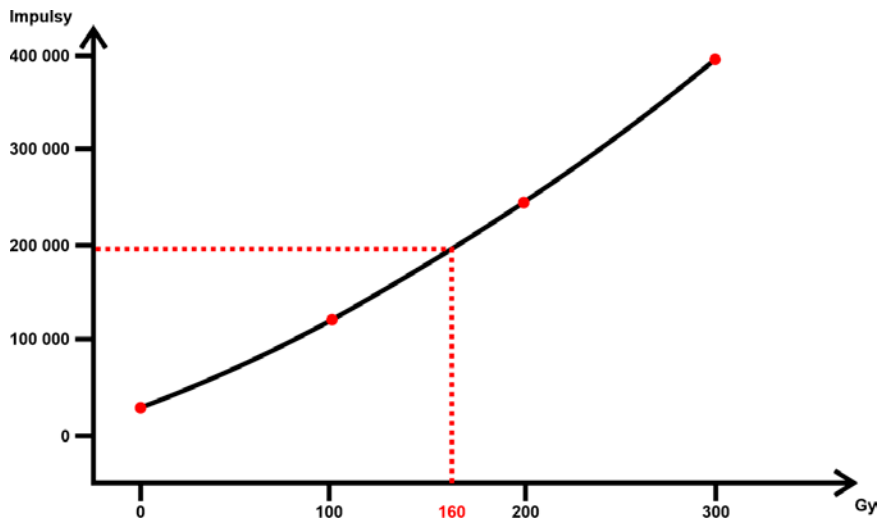
Wszystkie spreparowane uprzednio próbki poddawane są analizom przy użyciu czytników Reader-Analyser RA'04 TL lub OSL (fot. 3). Czytelniki TL bazują na termicznym wzbudzeniu próbek w 3 zakresach temperatur. Czytnik OSL mierzy wartości wyświecania próbki dla odpowiedniej długości fali. W obu przypadku analiza ma na celu uzyskanie średniej liczby impulsów z danej próbki dla różnych dawek napromieniowania. Informacje o średniej liczbie impulsów emitowanych przez napromieniowane próbki są podstawą do obliczenia dawki promieniowania zmagazynowanego w naturalnej próbce (rys. 1). Uwzględniając dawkę roczną od radionuklidów i promieniowania kosmicznego (które zmniejsza się wraz z głębokością ziemi) szacuje się wiek osadu. Błąd wyniku zależy od dokładności obróbki i klasy aparatury oraz może wynikać z niejasnych warunków depozycji materiału (non-bleaching sediment). Najczęściej szacuje się go na poziomie 15%. Pomimo tego ograniczenia, przy prawidłowej analizie można datować bardzo młode próbki o wieku rzędu zaledwie kilkuset lat. Doskonałym przykładem zastosowania tej metody jest datowanie osadów związanych z nowożytnym i współczesnym przemysłem metalurgicznym. Oszacowany dzięki metodzie OSL wiek na $0,44 \pm 0,06$ ka (UJK-OSL-68) został potwierdzony datowaniem ^{14}C węgla drzewnych pobranych z tej samej głębokości [7].

W przypadku badań wykonanych metodą TL najbardziej stabilniejsze wyniki otrzymywane są z osadów schył-

kowego plejstocenu. Przykładowo wiek wyższej terasy rzecznej w dolinie Kamionki oszacowano na $127,1 \pm 19,1$ ka (KIE-841)[8]. W przypadku tej metody należy pamiętać, że im starsza data, tym margines błędu (%) staje się większy.

Wyniki analiz wykonanych obiema metodami są bardzo przydatne w archeologii do datowania zabytków glinianych, jak również do ustalania tzw. kontekstu paleośrodowiskowego. Są one niezbędnym elementem do rozpoznania stanowiska i grają ważną rolę w wielu badaniach geologicznych [9][10]. Datowania osadów czwartorzędowych w naukach przyrodniczych mają ułatwić badaczom rekonstrukcję środowiska. Umożliwiają określenie czasu, w jakim powstała dana forma terenu (np. prędkość akumulacji kolejnych warstw osadów). Metody TL i OSL sprawdzają się przy datowaniu osadów holocenów, zwłaszcza fluwialnych, natomiast datowanie TL w analizie osadów starszych, plejstocenów, głównie glacialnych i fluwioglacjalnych [8] (fot. 4).

W zależności od składu analizowanych materiałów stosuje się różne metody ich obróbki przed przystąpieniem do właściwej analizy. Wpływają na to niska zawartość kwarcu, duża liczba frakcji żwirowej czy zawartość węglanów (CaCO_3). Te ostatnie podczas gwałtownej reakcji z kwasami przy trawieniu próbki mogą doprowadzić do jej wyzerowania (wzrost temperatury) lub degradacji. Dlatego do analizy zaleca się pobranie



Rys. 1. Schematyczny wykres przedstawiający sposób wyliczenia daty TL/OSL na podstawie uzyskanych wyników. Na osi Y zamieszczono liczby impulsów z czytnika, na osi X dawki w Gy dla 4 podstawowych dawek próbki (np. 0 „zero”, 100, 200 i 300 Gy) oznaczonych czerwonymi kropkami. Przerwana linia pokazuje lokalizację próbki „naturalnej” na podstawie uzyskanych liczb impulsów. Miejsce przecięcia z krzywą pozwala ustalić wartość dawki pochłoniętej promieniowania w Gy, która jest bazą do wyliczenia wieku osadu lub próbki w ka

Fig. 1. Schematic diagram showing how the TL/OSL date is calculated from the obtained results. The Y axis shows the number of pulses from the reader, the X axis shows the dose in Gy for the 4 basic sample doses (eg 0 „zero”, 100, 200 and 300 Gy) marked with red dots. The dashed line shows the location of the „natural” sample from the obtained pulse numbers. The point of intersection with the curve makes it possible to determine the value of the absorbed radiation dose in Gy, which is the basis for calculating the age of the sediment or sample in ka



Fot. 4. Pobieranie próbek z osadów budujących wzgórze kemowe z okresu zlodowaceń środkowopolskich (północne obrzeżenie Gór Świętokrzyskich; fot. T. Kalicki)

Photo 4. Sampling of the sediments building the kame hill from the Middle Polish Glaciations (northern margin of the Holy Cross Mountains; photo by T. Kalicki)

większej ilości takiego materiału. Przy odpowiedniej obróbce można nawet datować aluwia teras rzecznych, których osady mają stosunkowo dużą zawartość węgla. Badania takie prowadzono, np. w dolinie Ezousas na południowo-zachodnim Cyprze [11] (fot. 5)



Fot. 5. Wyższa terasa żwirowa rzeki Ezousas (południowo-zachodni Cypr; fot. S. Chwałek)

Photo 5. The higher gravel terrace of the Ezousas River (SW Cyprus; photo S. Chwałek)

W kontekście badań geologicznych metody luminescencyjne pozwalają ustalić czas funkcjonowania danego stanowiska archeologicznego i zrekonstruować paleośrodowisko, w jakim to stanowisko funkcjonowało. Za przykład mogą posłużyć badania z ostatnich lat prowadzone na Podlasiu, gdzie odkryto niewielkie, prehistoryczne struktury obronne z licznymi jamami zasobowymi, tzw. „valley forts” (fot. 6). Datowanie dna mineralnego wypełnienia jednej z fos dało wartość $2,93 \pm 0,44$ ka (UJK-OSL-98). Uzyskaną datę można wiązać z okresem ochłodzenia klimatu, zmuszającym ówczesnych ludzi do przechowywania coraz trudniej dostępnej żywności w obrębie tych struktur [9][10].

Podsumowanie

Wiedza z zakresu radiochemii i chemii radiacyjnej, znalazła wiele ciekawych zastosowań w geologii, geomorfologii, archeologii, a zwłaszcza geoarcheologii oraz konserwacji obiektów o znaczeniu historycznym [10] [11][12]. Metody datowania TL oraz OSL są niewątpliwie kluczowymi przy określaniu wieku osadów. W połączeniu z badaniami archeologicznymi umożliwiają również uzyskanie tzw. szerszego kontekstu dla badanego stanowiska. Metody różnią się sposobem wyświecania ekscytowanego kwarcu. Jednak w obu przypadkach pomiar jest możliwy dzięki zjawisku magazynowania energii promieniowania jonizującego tła w naturalnym dozymetrze, jakim jest w tych przypadkach kwarc.



Fot. 6. Wykop archeologiczny na stanowisku Jatwież Duża w Kotlinie Biebrzy odsłaniający część prehistorycznej struktury obronnej z późnej epoki brązu (fot. P. Przepióra)

Photo 6. Archaeological excavation at the Jatwież Duża site in the Biebrza Basin revealing part of the prehistoric defensive structure from the Late Bronze Age (photo by P. Przepióra)

Tomasz Kalicki, Marcin Frączek, Paweł Przepióra,
Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Instytut Geografii i Nauk o Środowisku,
Zakład Geomorfologii i Geoarcheologii, Zespół Laboratoriów Geomorfologiczno-Hydrologicznych Kielce,
Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa

Literatura:

- [1] Bluszcz A., 2000. Datowanie luminescencyjne osadów czwartorzędowych - teoria, ograniczenia, problemy interpretacyjne. Zeszyty Naukowe. Matematyka - Fizyka / Politechnika Śląska, 86, Wyd. Politechniki Śląskiej.
- [2] Fedorowicz S., 2011. Metodyczne badania w luminescencyjnym datowaniu osadów czwartorzędowych. Annales - Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B 66 (1), s.35-52.
- [3] sekcjaarcho.pl/metoda-badan-termoluminescencyjnych
- [4] Chruścińska A., Jesionowski B., Oczkowski H. L., Przegiętka K. R., 2008. Using the TL single-aliquot regenerative-dose protocol for the verification of the chronology of the Teutonic Order Castle in Malbork. Geochronometria, 30, s. 61-67.
- [5] Bluszcz A., Pazdur M., F., 1987. Thermoluminescence dating of the Middle Paleolithic at Wadi Kubbania, [w:] The Prehistory of Wadi Kubbania, t. 2, Stratigraphy, paleoeconomy, and environment, F. Wendorf, R. Schild, A. Close red., Dallas, s. 270-273.
- [6] Buko A., Dzieńkowski T., Kusiak J., 2008. Próba datowania ceramiki wczesnośredniowiecznej metodą termoluminescencji: przykład badań zespołu grodowego w Busównie.
- [7] Kalicki T., Frączek M., Przepióra P., Kuształ P., Kłusakiewicz E., Małęga E., 2019. Late Quaternary geomorphology and geoarchaeology in the rivers of the Holy Cross Mountains region, Central Europe, Quaternary Research 91 (2), s. 584-599.
- [8] Kalicki T., Przepióra P., Podrzycki Ł., 2017. Budowa i wiek wyższej terasy Kamionki na odcinku Suchedniów-Rejów. Acta Geographica Lodziensia, 106, s. 53-64, ISSN 0065-1249, cISSN 2451-0319.
- [9] Przepióra P., Żurek K., Kalicki T., Frączek M., Wawrusiewicz A., Piasecki A., Piasecka K., Fularczyk K., Biesaga P., Małęga E., 2019. Geoarchaeology of "Valley Forts": Case study at Jatwież Duża (Podlasie, E-Poland) -first results. 5th International Scientific Conference Geobalcanica 2019 Proceedings. Geobalcanica Society – Sofia, Republic of Bulgaria, s 43-50, ISSN 1857-7636.
- [10] Kalicki T., Głuszewski W., Frączek M., Przepióra P., Żurek K., 2020. Wykorzystanie datowań OSL w interdyscyplinarnych badaniach stanowisk archeologicznych na przykładzie Jatwieży Dużej (NE Polska). Książka streszczeń XX Konferencji naukowej „Analiza Chemiczna w Ochronie Zabytków”, Warszawa, s. 20-22.
- [11] Kalicki T., Chwałek S., Przepióra P., Frączek M., Kuształ P., Chrabąszcz M., Konstantinovski Puntos C., 2021. Sediments and age of terraces and floodplains of the Ezousas River in SW Cyprus. Acta Geobalcanica, 7-1, s. 1-6.
- [12] Głuszewski W., 2017. Radiation Technology Series No. 6, Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, IAEA, Chapter 18, 20.



Dr Ireneusz Olszak

Artykuł ten dedykujemy niespodziewanie i przedwcześnie zmarłemu **śp. dr. Ireneuszowi Olszakowi**, geologowi i geomorfologowi, jednemu z prekursorów datowań TL/OSL w Polsce, wieloletniemu pracownikowi Katedry Geomorfologii i Geologii Czwartorzędu Instytutu Geografii Uniwersytetu Gdańskiego, a w latach 2004-2012 Zakładu Geologii i Geomorfologii Instytutu Geografii i Studiów Regionalnych Akademii Pomorskiej w Słupsku. Jego wieloletnia współpraca i pomoc w datowaniach TL/OSL wykonywanych w Zespole Laboratoriów Geomorfologiczno-Hydrologicznych Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach była nieoceniona i pozwoliła na wykształcenie młodszego pokolenia specjalistów kontynuujących badania z użyciem tej metody.