ACTA SOCIETATIS METHEORITICAE POLONORUM
Rocznik Polskiego Towarzystwa Meteorytowego
Vol. 15, 2024

Zbigniew TYMIŃSKI[1,2,3], Agnieszka BURAKOWSKA[4], Artur JAŚKIEWICZ[2,5], Katarzyna TYMIŃSKA[4], Marcin STOLARZ[2], Michał KUĆ[4], Justyna MARGANIEC-GAŁĄZKA[1], Marek CZUDEK[1], Paweł SAGANOWSKI[1], Edward ILLER[1], Agata M. KRZESIŃSKA[3,6]

Badanie zawartości radionuklidów kosmogenicznych oraz składu mineralnego skał w celu weryfikacji ich pozaziemskiego pochodzenia

Investigation of the content of cosmogenic radionuclides and the mineral composition of rocks for verification of their extraterrestrial origin

Abstract: Cosmogenic radionuclides in meteoroids are produced in space in the process of activation. These nuclides have various lifetimes in range from a few days to several hundred thousand years and can therefore be helpful in solving several problems related to the study of meteoroids and their remains, both in space and on the Earth. The simplest application of cosmogenic radionuclide decay in meteorites is to determine the terrestrial age of meteorites, especially those whose fall has not been observed. In this article, we present an additional application of cosmogenic radionuclide measurements, namely for the verification of origin of rocks that show equivocal features and may potentially represent meteorites.

Keywords: meteorite, Łowicz, pseudometeorite Wyszków, cosmogenic radionuclides

Wstęp

Spektrometria znajduje coraz szersze zastosowanie w meteorytyce. Jej użyteczność wynika z faktu, że meteoroidy znajdując się w przestrzeni kosmicznej bombardowane są przez wysokoenergetyczne cząsteczki promieniowania kosmicznego, co prowadzi do powstawania charakterystycznych radioizotopów -promieniotwórczych, np. ^{7}Be, ^{22}Na, ^{26}Al, ^{40}K, ^{46}Sc, ^{48}V, ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{56}Co, ^{57}Co czy ^{60}Co

[1] Narodowe Centrum Badań Jądrowych OR POLATOM, Otwock-Świerk; e-mail: z.tyminski@polatom.pl

[2] Pracownia Komet i Meteorów, Polska Sieć Bolidowa, ul. Bartycka 18, Warszawa

[3] Polskie Towarzystwo Meteorytowe

[4] Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock-Świerk

[5] Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej

[6] Centre for Planetary Habitability, Department of Geosciences, University of Oslo, Norway

(Eberhardt 1963, Spergel 1986, Leya 2006). W przypadku badań obserwowanych tzw. świeżych spadków meteorytów (Wiśniewski i in. 2017) prawie zawsze wyznaczane są zawartości wspomnianych nuklidów kosmogenicznych (Eugster i in. 2006). Z uwagi na to, że czas połowicznego rozpadu poszczególnych izotopów zmienia się w zakresie od kilku dni do kilkuset tysięcy lat, badania izotopów kosmogenicznych znajdują zastosowanie w datowaniu różnych wydarzeń istotnych dla historii meteorytu. Na przykład analiza zależności stężeń radionuklidów takich jak ^{22}Na i ^{26}Al, który ma najdłuższy czas połowicznego rozpadu, może być pomocna przy określeniu ziemskiego wieku w szczególności tych meteorytów, których spadki nie zostały zaobserwowane (Jull i in. 1995). Z kolei zestawienie zawartości poszczególnych izotopów o różnym okresie półrozpadu pozwala na wyznaczenie czy też weryfikację daty spadku (Shrbený i in. 2022, Tymiński 2023a, 2023b). Podobne analizy wymienionych emiterów , w połączeniu z oznaczeniem zawartości np. ^{60}Co, są pomocne przy szacowaniu rozmiaru meteoroidu przed wejściem w atmosferę oraz przy określaniu głębokości ekranowania (osłony) meteorytu (Graff i in. 1990, Leya i in. 2010, Łuszczek i in. 2012).

Metody spektrometrii mogą mieć także zastosowanie w badaniach skał podejrzanych o meteorytową genezę. Meteoryty, zwłaszcza chondryty i achondryty, nie podniesione tuż po spadku ulegają wietrzeniu i dezintegracji, wskutek czego ich struktura i skład mineralny zmieniają się w stopniu utrudniającym jednoznaczną identyfikację. Stąd też często problemem jest odróżnienie za pomocą typowych obserwacji makroskopowych i mikroskopowych zwietrzałej skały meteorytowej, szczególnie achondrytowej, od zwietrzałej skały ziemskiej.

Ponadto metody spektrometrii promieniowania mogą odegrać istotną rolę przy weryfikacji skał podejrzanych o pochodzenie pozaziemskie, ponieważ pozwalają zmierzyć nawet śladowe zawartości radionuklidów. Meteoryty, w przeciwieństwie do skał pochodzenia ziemskiego, zawierają radionuklidy kosmogeniczne. Nawet po długim czasie od spadku, obecne są w nich niektóre nuklidy, takie jak ^{22}Na, ^{60}Co czy ^{26}Al.

W pracy tej przedstawione zostały wyniki badań przeprowadzonych w celu weryfikacji skał, które cechami zewnętrznymi przypominały meteoryty. Materiał ten, testowany technikami spektrometrii , został jednocześnie poddany badaniom z wykorzystaniem XFR, mikroskopii skaningowej SEM-EDS. Wyniki obu metod były zgodne i prowadziły do tych samych wniosków.

Instrumenty i metodologia

W pomiarach spektrometrycznych radionuklidów kosmogenicznych przeprowadzonych w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) został wykorzystany detektor germanowy HPGe firmy Canberra/Mirion, typu GR4520, o względnej wydajności 45% (dla energii 1332,5 keV, ^{60}Co) oraz energetycznej zdolności rozdzielczej FWHM (ang. *Full With at Half Maximum*) na poziomie 2,0 keV. Kryształ detektora pracuje w temperaturze ciekłego azotu, a jego głowica umieszczona jest w komorze pomiarowej, której ściany zbudowane są z ołowiu o grubości

10 cm i pokryte są dodatkowo blachą miedzianą (rys. 1). W celu uzyskania dobrej wartości stosunku sygnału do tła promieniowania, czas pomiaru powinien wynosić od kilku do kilkunastu dni, w zależności od wielkości badanych okazów i stężenia radionuklidów kosmogenicznych. Aktywność promieniotwórczą radionuklidów oblicza się za pomocą symulacji z zastosowaniem kodu Monte Carlo MCNP6.2 (Werner i in. 2018), które pozwalają na wyznaczenie wydajności układu dla danej geometrii pomiarowej.

Przy wstępnych badaniach składu chemicznego skał podejrzanych o kosmiczne pochodzenie przeprowadzanych na Politechnice Warszawskiej, na Wydziale Inżynierii Materiałowej, zastosowano spektrometr XRF marki Olympus Delta. Jest to narzędzie w wersji przenośnej, umożliwiające szybkie i nieinwazyjne określenie składu pierwiastkowego nieznanych materiałów. Spektrometr wykorzystuje zjawisko fluorescencji rentgenowskiej do jakościowego i ilościowego określania zawartości pierwiastków w próbkach stałych i ciekłych. Pomiary obejmują swoim zakresem pierwiastki od magnezu (Mg) do ołowiu (Pb). W tej konfiguracji (przenośnej, do pomiarów *in-situ*) spektrometr nie mierzy lżejszych pierwiastków, takich jak tlen (O), fluor (F) czy sód (Na). Obserwacje i pomiary wykonywano również na skaningowym mikroskopie elektronowym ChemiSEM Axia firmy ThermoFisher. Urządzenie to wykorzystywane jest do analizy strukturalnej i składu chemicznego próbek. Wyposażone jest w funkcję chemicznego obrazowania, a także umożliwia dokładne badanie powierzchni próbek na poziomie mikro- i nanometrycznym. Dzięki wysokiej rozdzielczości oraz możliwości obrazowania w różnych trybach, SE (ang. *Secondary Electrons*), jak i BSE (ang. *Backscattered Electrons*). Tryb BSE pozwala obserwować kontrast atomowy, a co za tym idzie, także różnice gęstości materiału, z niezwykłą czułością. Szybką identyfikację składników chemicznych na powierzchni próbek realizowano przy wykorzystaniu detektora promieniowania charakterystycznego EDS (ang. *Energy Dispersive Spectroscopy*).

Rys. 1. Fragment meteorytu Ribbeck z pierwszego znaleziska – jeden z trzech fragmentów o masie 54 g (całkowita masa rozbitego okazu to około 171 g); meteoryt umieszczony na detektorze HPGe w komorze z ołowiu osłoniętej miedzią.

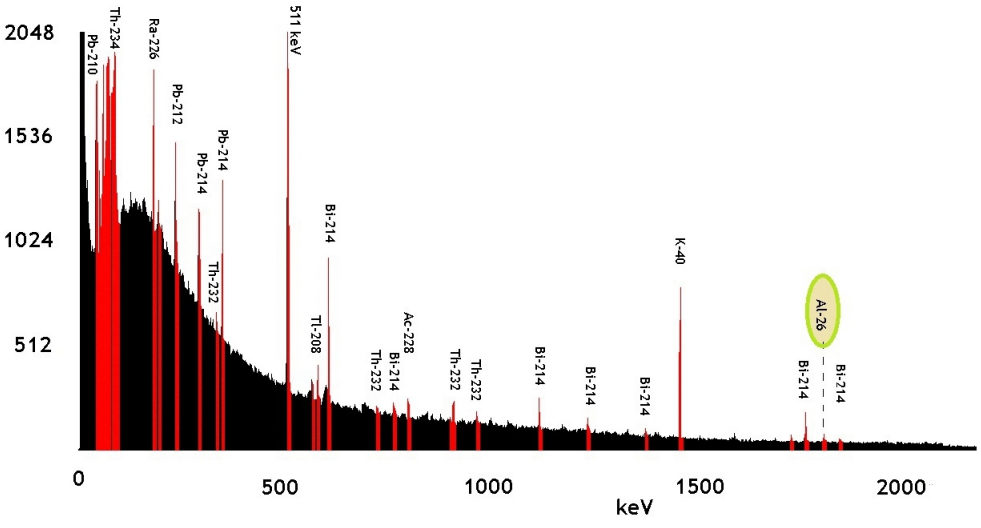
Fig. 1. *Fragment of the Ribbeck meteorite from the first find, weighing 54 g (the total mass of the broken specimen is approximately 171 g); meteorite placed on the HPGe detector in a lead shield chamber lined with copper.*

Okazy meteorytów Łowicz

Dotychczas metodami spektrometrii przebadano dwa okazy meteorytu Łowicz ważące odpowiednio 61,6 g (rys. 2) oraz 173,5 g. Okazy pochodziły z prywatnych kolekcji, przy czym jeden był materiałem certyfikowanym, znalezionym niedługo po spadku i posiadającym metryczkę znanej kolekcji meteorytów w Muzeum Ziemi Polskiej Akademii Nauk. Drugi okaz, bardziej zwietrzały, został podniesiony z pola ornego kilka lat po spadku. W obu meteorytach wykryto wyraźną linię promieniowania o energii 1,809 MeV pochodzącą z rozpadu kosmogenicznego radionuklidu ^{26}Al, co stanowiło niezaprzeczalny dowód na kosmiczną genezę skały. Analizy pomiarów spektrometrycznych tych dwóch meteorytów stanowią wyniki referencyjne i kolejne badania radionuklidów w okazach spod Łowicza będą mogły być odnoszone do tych dwóch pomiarów.

Pozostałe testowane okazy o znacznie mniejszej masie, od kilku do kilkunastu gramów, były badane tylko metodami XRF. Analiza składu pierwiastkowego zewnętrznej zwietrzeliny w takich znaleziskach często wykazuje małe zawartości niklu na powierzchni, poniżej 1,0%, typowe dla niektórych stali szlachetnych. Struktura wewnętrzna natomiast, odsłonięta po przeszlifowaniu powierzchni w przypadku meteorytów i ich analiza, powinna ukazać ziarna oliwinu oraz dać średnie wyniki, w granicy ±5% przedstawionych wartości: Fe – 74,5%, Ni – 5,8%, Si – 13,9%, Al – 5,2%, P – 0,3%, Mn – 0,2%, co potwierdza skład pierwiastkowy i budowę odpowiadającą klasyfikacji mezosyderytu (Karwowski 2003). Badania takie zostały wykonane na kilkunastu skałach, znalezionych w polu spadku i przypominających zwietrzałe meteoryty, z których tylko nieliczne okazały się pochodzenia kosmicznego. Jeden ze znalezionych „meteorytów" był nietypowym stopem żelaza z glinem, którego przekrój po wytrawieniu przypominał figury Widmanstättena (Kozłowski 2023).

Rys. 2. Okaz badanego meteorytu Łowicz o wadze 61,6 g, odnaleziony niedługo po spadku (fot. M. Stolarz).
Fig. 2. *The specimen of the Łowicz meteorite weighing 61.6 g, found shortly after the fall (photo by M. Stolarz).*



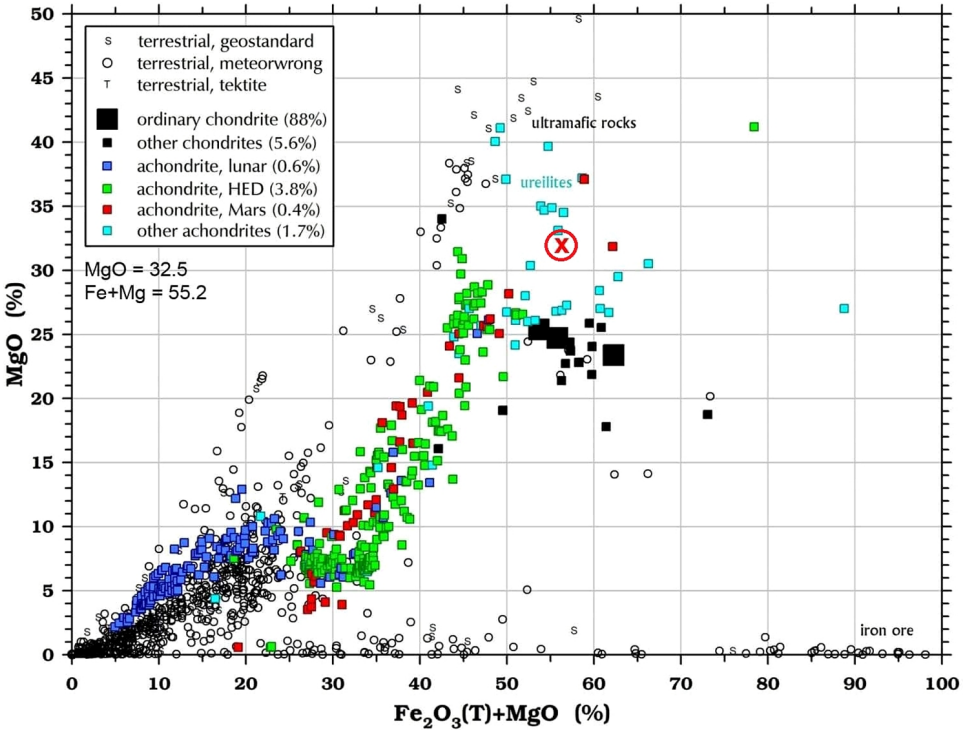
Rys. 3. Widmo promieniowania z zaznaczonymi liniami z tła oraz z oznaczonym na zielono opisem linii pochodzącej z rozpadu ^{26}Al w meteorycie Łowicz.
Fig. 3. *The -ray spectrum with the background lines marked and the -ray line coming from the decay of ^{26}Al in the Łowicz meteorite, marked in green colour.*

Znalezisko z Litwy

W 2023 roku do badań w NCBJ trafiły fragmenty skały znalezionej na Litwie, podejrzanej o pochodzenie kosmiczne (rys. 4). Znalezisko zostało poddane wstępnej analizie składu chemicznego (tab. 1). Struktura skały wykluczała genezę chondrytową, jednak uzyskane w wyniku analiz zawartości K_2O <0,6% i SiO_2 <60% oraz zawartości Fe_2O_3, K_2O, MgO, Al_2O_3, MnO i CaO wskazywały, że skała może

Rys. 4. Fragment znaleziska z Litwy ukazujący powierzchnię skały.
Fig. 4. *Fragment of a rock find from Lithuania showing its surface.*

być pozaziemska. Co więcej, mogła należeć do rzadkiej grupy achondrytów, ze wskazaniem na ureility (rys. 5, tab. 1). Z uwagi na to, że okazał był mocno zwietrzały, niemożliwa była dokładna analiza strukturalna.



Rys. 5. Wyniki analizy zawartości składu chemicznego okazu z Litwy zaznaczono czerwonym kółkiem z krzyżykiem (dane dla poszczególnych grup meteorytów ze stron WUSTL).
Fig. 5. *Results of the chemical composition analysis of a specimen from Lithuania marked with a crossed red circle (data for meteorite groups from WUSTL-sites).*

Tabela 1. Wyniki (%wag.) analizy geochemicznej próbki pochodzącej ze znalezionego na Litwie okazu.
Table 1. *Results (wt%) of geochemical analysis of a sample from Lithuania.*

SiO_2	37,5%
MgO	32,5%
Fe_2O_3	22,7%
Al_2O_3	3,40%
CaO	2,61%
SO_2	0,74%
MnO	0,21%
K_2O	0,10%
TiO_2	0,06%
NiO	0,02%

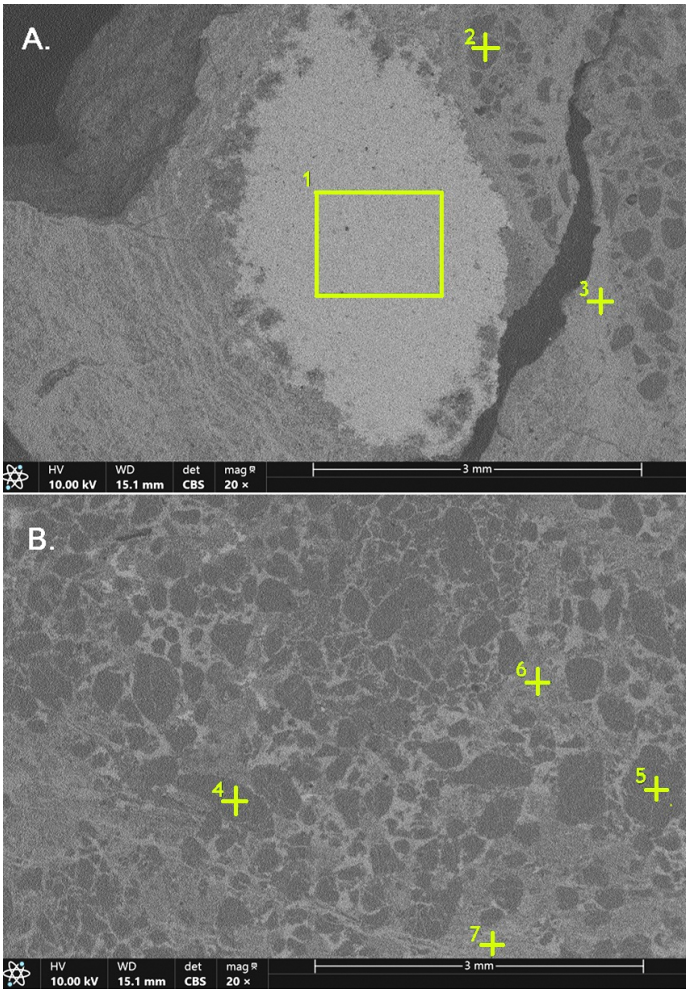
Do badań metodami spektrometrii posłużyły fragmenty skały w postaci dwóch płytek o grubości 0,5 cm i masie całkowitej około 175 g. Kilkudniowe pomiary spektrometryczne obu płytek, wykonane w NCBJ, nie wykazały obecności radionuklidów kosmogenicznych. Wyniki badań kosmofizycznych i geologicznych były spójne – w obu przypadkach brakowało jednoznacznych cech meteorytowych. Zatem skała, z której pochodziły próbki była ziemskiego pochodzenia i nie poddawano jej już kolejnym analizom.

Pseudo-meteoryt Wyszków

Okaz znaleziony pod Wyszkowem to zwietrzały fragment skały o masie 52,8 g, na który natrafiono na wzniesieniu nad brzegiem rzeki Bug w 2011 roku. Znalezisko podejrzane o kosmiczne pochodzenie ze wskazaniem na chondryt zwyczajny, było na tyle ciekawe, że zostało opisane w niniejszej pracy (rys. 6, Kosiński 2019).

W 2023 roku okaz ten trafił do NCBJ, gdzie przeprowadzono jego badania. Z jednej strony okazu wykonany był zgład, więc w pierwszej kolejności przyjrzano mu się pod mikroskopem w świetle odbitym i nie zaobserwowano cech typowych dla chondrytów – nie było w nim widać żadnych chondr, a jedynie efekty topienia minerałów. Następnie zostały wykonane badania nieniszczące na zawartość radionuklidów kosmogenicznych, lecz kilkudniowy pomiar spektrometryczny na detektorze HPGe nie wykazał ich podwyższonej zawartości. Niestety, taki wynik wskazywał na pochodzenie ziemskie. W związku z tym zdecydowano się na przeprowadzenie badania weryfikującego przy pomocy SEM w Politechnice Warszawskiej, na Wydziale Inżynierii Materiałowej. W tym celu wyselekcjonowano na zgładzie kilka obszarów (rys. 7), w których określono skład chemiczny – szczególnie interesująca była zawartość niklu, w który to materia pozaziemska jest wzbogacona w stosunku do skał naszej planety. Badania wykonano przy napięciu przyspieszającym 10 kV, a czas akwizycji wynosił 45 s. Wyniki analizy składu wybranych mikroobszarów przedstawiono w tabelach 2 i 3. Najbardziej interesująca, ze względ-

Rys. 6. Okaz znaleziony pod Wyszkowem, podejrzany o pochodzenie kosmiczne (fot. A. Grabowska, Kosiński 2019).
Fig. 6. *A specimen found near Wyszków, suspected of cosmic origin (photo by A. Grabowska, Kosiński 2019).*



Rys. 7. Zgład znaleziska „Wyszków" w obrazie BSE z zaznaczonymi punktami pomiarowymi (1–7); A – widok noduli metalicznej, B – widok matrycy okazu.
Fig. 7. *The BSE image of the „Wyszków" specimen with marked measurement points (1–7); A – view of the metallic nodule, B – view of the specimen matrix.*

Tabela 2. Wyniki analizy składu chemicznego noduli metalicznej oraz towarzyszącego jej ciasta skalnego (punkty pomiarowe 2, 3).
Table 2. *Results of chemical composition analysis (wt%) of the metallic nodule and its vicinity (measurement points 2, 3).*

Pierwiastek	Zawartość (% wag.)		
	Region 1	Punkt 2	Punkt 3
Si	2,8±0,1		39,1±0,3
O	2,1±0,2	36,0±0,3	60,5±0,5
Fe	95,1±3,4	64,0±2,4	
Na			0,4±0,1
Liczba zliczeń:	684 cps	1390 cps	1226 cps

du na możliwą zawartość niklu, była nodula metaliczna (ozn. Region 1 w obszarze A na rysunku 7). Wynik analizy jej składu wskazał, iż zawiera: Fe – 95,1%, Si – 2,8% oraz O – 2,1% (%wag.) i nie zaobserwowano w niej niklu (tab. 2). Drugi obszar ozn. B (rys. 7) stanowił ciasto skalne, którego skład został zbadany w pięciu punktach (2–7) (rys. 7). Zawierało ono: Fe – od 0% do 58%, Si – od 4,9 do 39% oraz O – od 37% do 75% oraz do kilku %wag. Na, S i Al (tab. 3). Brak niklu w każdym z badanych obszarów potwierdził negatywny wynik spektrometrii wskazując, że okaz nie może być kosmicznego pochodzenia. Potwierdziło to też po raz kolejny przydatność tej metody w identyfikowaniu materii pozaziemskiej.

Tabela 3. Wyniki analizy składu chemicznego matriks znaleziska „Wyszków" (%wag.) w punktach pomiarowych 4–7.
Table. 3. *Results of the chemical composition analysis (wt%) of matrix area analysis at measurement points 4–7.*

Pierwiastek	Zawartość (%wag.)			
	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6	Punkt 7
N	4,9±0,6			
Si	18,6±0,4	39,0±0,3	8,3±0,2	4,9±0,1
Fe		10,0±1,5	49,4±3,1	57,8±2,6
O	75,1±1,0	51,0±0,4	40,8±0,5	37,3±0,3
Na	1,1±0,2			
Al	0,3±0,1			
S			0,7±0,1	
Liczba zliczeń:	659 cps	1556 cps	1221 cps	1296 cps

Znalezisko z obszaru moreny czołowej na Warmii w okolicach Cerkiewnika

W 2021 roku na stoku wysoczyzny morenowej z epoki plejstocenu, w pobliżu jeziora Limajno i miejscowości Cerkiewnik (Warmia), znaleziono kamień magnetyczny, który swoim wyglądem przypominał zwietrzały achondryt, poprzecinany czarnymi żyłkami, przypominającymi efekty metamorfizmu szokowego (rys. 8). Znalezisko pochodziło ze sterty zebranych na polu kamieni. Badania metodami spektrometrii wykluczyły jednak jego kosmicznego pochodzenie, a analizy składu chemicznego znaleziska z wykorzystaniem techniki XRF potwierdziły, że jest skałą ziemską (Fe – 46,8 %wag., Si – 26,7 %wag., Al – 18,4 %wag., Ti – 3,6 %wag., P – 2,8 %wag., S – 1,0 %wag. oraz Mn – 0,4 %wag.). Ciekawostką jest tu natomiast fakt, że na powierzchni okazu wykryto emiter , jakim jest ^{137}Cs. Po tej identyfikacji wykonano wstępne testy próbek pobranych z okolicy. Badania te potwierdziły podwyższoną zawartość tego radionuklidu w miejscowej florze. Pierwsze podejrzenie wskazało na opad z katastrofy w Czarnobylu w 1986 roku. Jednakże, aby potwierdzić tę teorię niezbędne są dalsze prace. Podobne zanieczyszczenia były już odnotowywane w przypadku meteorytu Czelabińsk (Querfeld i in. 2017), w którym odnotowano śladowe ilości ^{137}Cs oraz dużą zawartość ^{90}Sr.

Rys. 8. Zdjęcie okazu znalezionego na terenie wysoczyzny morenowej w pobliżu Jeziora Limajno.
Fig. 8. *Photo of a specimen found on a moraine plateau near the Limajno Lake.*

Podsumowanie

Spektrometria promieniowania jest dobrą metodą pomiarową służącą do identyfikacji materii pozaziemskiej, stosowaną od ponad dekady w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ). Metoda ta może być przydatna przy identyfikacji materii meteorytowej, w szczególności achondrytowej, często trudnej do odróżnienia od skał ziemskich metodami makroskopowymi. Jest to metoda nieniszcząca użyteczna w przypadku wyjątkowych okazów, podejrzanych o kosmiczne pochodzenie lub w przypadku niechęci właściciela do mechanicznego ingerowania w posiadany okaz (np. przygotowanie próbek do badań niszczących czy wykonywanie preparatów mikroskopowych do badań petrograficznych). Metodą tą jesteśmy w stanie wykryć obecność charakterystycznych radionuklidów kosmogenicznych, emitujących promieniowanie , t.j.: ^{7}Be, ^{22}Na, ^{26}Al, ^{40}K, ^{46}Sc, ^{48}V, ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{56}Co, ^{57}Co czy ^{60}Co.

Pomiar spektrometryczny ma niestety pewne wady – są nimi duże koszty badań, ich czasochłonność oraz konieczna minimalna waga okazu, niezbędna do otrzymania wystarczającej liczby zliczeń, a co za tym idzie odpowiedniej jakości stosunku sygnał/tło (w naszym przypadku to ok. 30–35 g materii chondrytowej). Istnieje też ryzyko błędnej interpretacji wyniku, w przypadku badania meteorytów, które przebywają od dawna na Ziemi (mają długi wiek ziemski – ang. *terrestrial age*), znajdowały się na dużych głębokościach na planetoidzie macierzystej (duża głębokość ekranowania – ang. *shielding depth*) czy pochodziły z meteoroidów, których czas ekspozycji na promieniowanie kosmiczne był stosunkowo krótki (ang. *cosmic ray exposure age*). W takich przypadkach krótkożyciowe radionuklidy mogły ulec rozpadowi, a długożyciowe pozostać poniżej poziomu detekcji metodami spektrometrii . Dlatego rekomenduje się, aby okazy szczególnie przypominające meteoryty badać także wykorzystując inne techniki np. rentgenowską analizę fluorescencyjną XRF (ang. *X-ray fluorescence*) czy mikroskopię elektronową SEM-EDX.

Podziękowania

Składamy podziękowania Pani dr inż. Katarzynie Łuszczek z Zakładu Geologii i Wód Mineralnych Politechniki Wrocławskiej za pomoc i cenne uwagi dotyczące pracy.

Składamy także podziękowania wszystkim, którzy biorą czynny udział w poszukiwaniach meteorytów oraz dostawcom i kolekcjonerom meteorytów, którzy godzą się na ich naukowe badania.

Literatura

Eberhardt P., Geiss J., Lutz H., 1963, *Neutrons in meteorites, Earth Science and Meteoritics*, North-Holland, Amsterdam, s. 143–168.

Eugster O., Herzog G.F., Marti K., Caffee M.W., 2006, *Irradiation Records, Cosmic-Ray Exposure Ages, and Transfer Times of Meteorites*, Meteorites and the Early Solar System II, Space Science Series, University of Arizona Press. doi:10.2307/j.ctv1v7zdmm

Graff T., Singer P., 1990, *Cosmogenic nuclides and nuclear tracks in the chondrite Knyahinya*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 54, s. 2511–2520.

Jull A.J.T., 2006, *Terrestrial Ages of Meteorites*, Meteorites and the Early Solar System II, (ed. S. Lauretta, H. Y. McSween), Space Science Series, University of Arizona Press. doi:10.2307/j.ctv1v7zdmm

Karwowski Ł., 2003, *The new mineralogical data on the Łowicz meteorite*, Prace Spec. PTMin., 22, 2003, s. 102–104.

Kosiński J. W., 2019, *Meteoryt Wyszków*, Acta Societatis Metheoriticae Polonorum, 10, s. 92–94.

Kozłowski S., 2023, *Zagadkowe znalezisko z elipsy spadku meteorytu Łowicz*, Acta Societatis Metheoriticae Polonorum, 14, s. 93–99.

Krzesińska A.M., 2023a, *Charakterystyka petrologiczna i chemiczna meteorytu Antonin – klasyfikacja oraz zarys historii termicznej i uderzeniowej*, Acta Societatis Metheoriticae Polonorum, 14, s. 114–133.

Leya I., Masarik J., 2010, *Cosmogenic nuclides in stony meteorites revisited*, Meteoritics & Planetary Science. doi:10.1111/j.1945-5100.2009.tb00788.x

Łuszczek K., Dalcher N., Leya I., 2012, *Cosmogenic and radiogenic noble gases in Sołtmany L6 chondrite*, Meteorites, 2, s. 39–43.

Querfeld R, Tanha M.R., Heyer L., Renz F., Guggenberger G., Brandstätter F., Ferričre L., Koeberl Ch., Steinhauser G., 2017, *On the occurrence and origin of anthropogenic radionuclides found in a fragment of the Chelyabinsk (LL5) meteorite.* doi:10.1111/maps.12855

Shrbený L., Krzesińska A.M., Borovička J., Spurný P., Tymiński Z., Kmieciak K., 2022, *Analysis of the daylight fireball of July 15, 2021, leading to a meteorite fall and find near Antonin, Poland, and a description of the recovered chondrite*, Meteoritics & Planetary Science, vol. 57(12), s. 2108-2126. doi:10.1111/maps.13929

Spergel M.S., Reedy R.C., Lazareth O.W., Levy P.W., Slatest L.A., 1986, *Cosmogenic Neutron--Capture-Produced Nuclides in Stony Meteorites*, Journal of Geophysical Research, 91, D483–94.

Tymiński Z., Hult M., Krzesińska A.M., Tymińska K., Lutter G., Saganowski P., Marissens G., Stroh H., Burakowska A., Ziemek T., Stachowicz M., El-Mallul A., et al., 2023a *Underground Radioactivity Measurements of Meteorites: Development of Methods Suitable to Determine Precise Terrestrial Age of Recent Falls,* Applied Radiation and Isotopes, 195, 110733.

Tymiński Z., Burakowska A., Krzesińska A.M., Tymińska K., Kuć M., Iller E., Kmieciak K., 2023b, *Radionuklidy kosmogeniczne w meteorycie Antonin*, Acta Societatis Metheoriticae Polonorum, 14, s. 192–199.

Werner C.J., et al., 2018, MCNP Version 6.2 Release Notes. Los Alamos National Laboratory report LA-UR-18-20808.

Wiśniewski M., Żołądek P., Olech A., Tymiński Z., Maciejewski M., Fietkiewicz K., Rudawska R., Gozdalski M., Gawroński M., Suchodolski T., Myszkiewicz M., Stolarz M., Polakowski K., 2017, *Current status of Polish Fireball Network*, Planetary and Space Science, 143, s. 12–20.

Źródła internetowe

EN, https://www.asu.cas.cz/~meteor/bolid/2021_07_15

BIPM-5, Monographie BIPM-5, Vol. 1-8 (2004-2016)

Metbull, www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php

Metbull 77489, www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?&code=77489

WUSTL-sites, sites.wustl.edu/meteoritesite/items/chemical-composition-of-meteorites/