

Krzysztof SZOPA^{1,2*}, Łukasz KARWOWSKI¹, Tomasz KRZYKAWSKI¹,
Tomasz BRACHANIEC¹

Fragmenty kopalnego meteorytu z Lechówki: charakterystyka mineralogiczna i geochemiczna

Fragments of strongly weathered meteorite from Lechówka: mineralogical
and geochemical characterisation

Abstract: Fossil iron meteorites are extremely rare in the geological sedimentary record. In the boundary clay from the outcrop at the Lechówka quarry (Poland), fragments of the paleometeorite were found in the Cretaceous-Paleogene boundary clay layer. The fragments of meteorite (2–6 mm in size) and meteoritic dust are metallic-grey in colour. Analyses of the meteorite from Lechówka reveal the presence of Ni-rich minerals with a total Ni amount of 2–3 wt%. They are represented by: taenite, kamacite, schreibersite, Ni-rich magnetite, and Ni-rich goethite. The investigated remnants of paleometeorite apparently represent an independent fall and does not seem to be derived from the K-Pg impactor.

Keywords: paleometeorite, taenite, kamacite, schreibersite, Lechówka

Wstęp

Meteoryty kopalne są bardzo rzadkimi obiektami, które sporadycznie znajduje się w różnych osadach na Ziemi. Najpospolitszą grupą meteorytów kopalnych są szwedzkie chondryty zwyczajne, które zostały znalezione w osadach ordowickich (ok. 470 mln lat; Heck i in., 2010; Bogard 2011; Schmitz 2013; Schmitz i in., 2009, 2014; Swindle i in. 2014). Niemal sto sztuk, tych kopalnych meteorytów zostało opisanych z kamieniołomu Thorsberg w Kinnekulle (Schmitz i in. 2001, 2009, 2014; Schmitz 2013). Podobne paleometeoryty znane są także z kamieniołomu Garde (meteoryt Brunflo; Thorslund i in. 1984) oraz z Billingen Mountain (Gullhögen 2001; Tassinari i in. 2004). Ponadto, wielu naukowców skupia się nad badaniem ziaren chromitu, które uznawane są za relikty meteorytów (Alw-

¹ Katedra Geochemii, Mineralogii i Petrografii, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski w Katowicach, ul. Będzińska 60; 41-200 Sosnowiec; e-mail: krzysztof.szopa@us.edu.pl, lukasz.karwowski@us.edu.pl, tomasz.krzykowski@us.edu.pl, tomasz.brachaniec@o2.pl

² Centrum Studiów Polarnych, Krajowy Naukowy Ośrodek Wiodący – KNOW, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski w Katowicach, ul. Będzińska 60; 41-200 Sosnowiec;

* autor korespondencyjny – krzysztof.szopa@us.edu.pl

mark i Schmitz 2007; Schmitz 2013; Schmitz i in. 1997, 2001, 2003, 2008, 2009, 2014; Cronholm i Schmitz 2010; Lindskogi in. 2012; Meier in. 2009, 2014) i występują w podobnych pod względem wieku (~470 mln lat) osadach w Szwecji, Chinach i Rosji. Silnie zmienione relikty chondrytów znane są również z krateru uderzeniowego Morokweng w RPA (Maier i in. 2006). Inne typy kopalnych meteorytów (np. żelaznych) lub ich pozostałości są dość rzadkie. Do tej pory istnieje tylko kilka znalezisk, które zostały dobrze opisane. Należą do nich: 1) meteority żelazny wieku kredowego (~120 mln lat) Lake Murray, który jest przedstawicielem klasy IIAB (Lapaz 1953); 2) Gay Gulch oraz; 3) Skookum. Dwa ostatnie nie mają jeszcze ustalonej pozycji stratygraficznej (Buchwald 1975).

Odsłonięcie w Lechówce to pierwszy kompletny zapis sedymentologiczny granicy K-Pg (Kreda–Paleogen) w Polsce (Machalski i in. 2016), ze stwierdzoną anomalią PGE (Racki i in. 2011). Największa odnotowana anomalia irydowa (9,8 ppb) znajduje się ok. 10 cm poniżej tzw. łu granicznego (Racki i in. 2011). łu graniczny to głównie mieszanina smektytu, montmorylonitu, kaolinitu, miki oraz krzemionki. Minerale akcesoryczne są głównie reprezentowane przez diopsyd, augit oraz cyrkon. W łu granicznym stwierdzono także mikrosferule (Brachaniec i in. 2014) zbudowane głównie ze smektytów. Te mikrometrowej wielkości obiekty są podobne do sferul znalezionych w osadach granicy K-Pg w innych miejscach na świecie. Zarówno obecność sferul, anomalia PGE, podwyższona zawartość Ir i Au są zapisem spadku dużego ciała pozaziemskiego. Zjawiska te Racki i in. (2011) wiążą ze spadkiem meteorytu – chondrytu węglatego (Kyte 1998; Shukolyukov i Lugmair 1998) na Półwysep Jukatan i do Zatoki Meksykańskiej, który spowodował powstanie krateru Chicxulub. W tych samych osadach zostały znalezione zwietrzałe fragmenty meteorytu w których przetrwały pierwotne minerały pochodzenia pozaziemskiego (Szopa i in. 2017).

Celem niniejszego artykułu jest charakterystyka mineralogiczna znalezionych fragmentów meteorytu.

Geologia obszaru badań

Odsłonięcie w Lechówce, z badanymi utworami kredy i paleogenu znajduje się w wschodniej części Polski, w pobliżu granicy polsko-ukraińskiej (fig. 1A). Wychodnia skał ma około 4,5 m głębokości i około 20 m szerokości. W profilu odsłaniającym się w Lechówce zostało wydzielone osiem jednostek skalnych o różnej stratygrafii i litologii (Racki i in. 2011; fig. 1B). Dwa najniższe wydzielienia (opoka o ok. 10 cm miąższości i brekcja tektoniczna/krasowa o miąższości 70 cm) nie zostały odsłonięte podczas prac terenowych. Kolejność sześciu pozostałych wydzieleń jest następująca (w kolejności stratygraficznej):

- warstwa zbudowana z opoki (~100 cm), która przechodzi w bardziej odwapnioną na kontakcie z wapieniami;
- horyzont margli (~40 cm). Racki i in. (2011) stwierdził, że największa koncentracja irydu (9,8 ppb) występuje w tej części, w odległości ok. 10 cm poniżej warstwy łu granicznego;

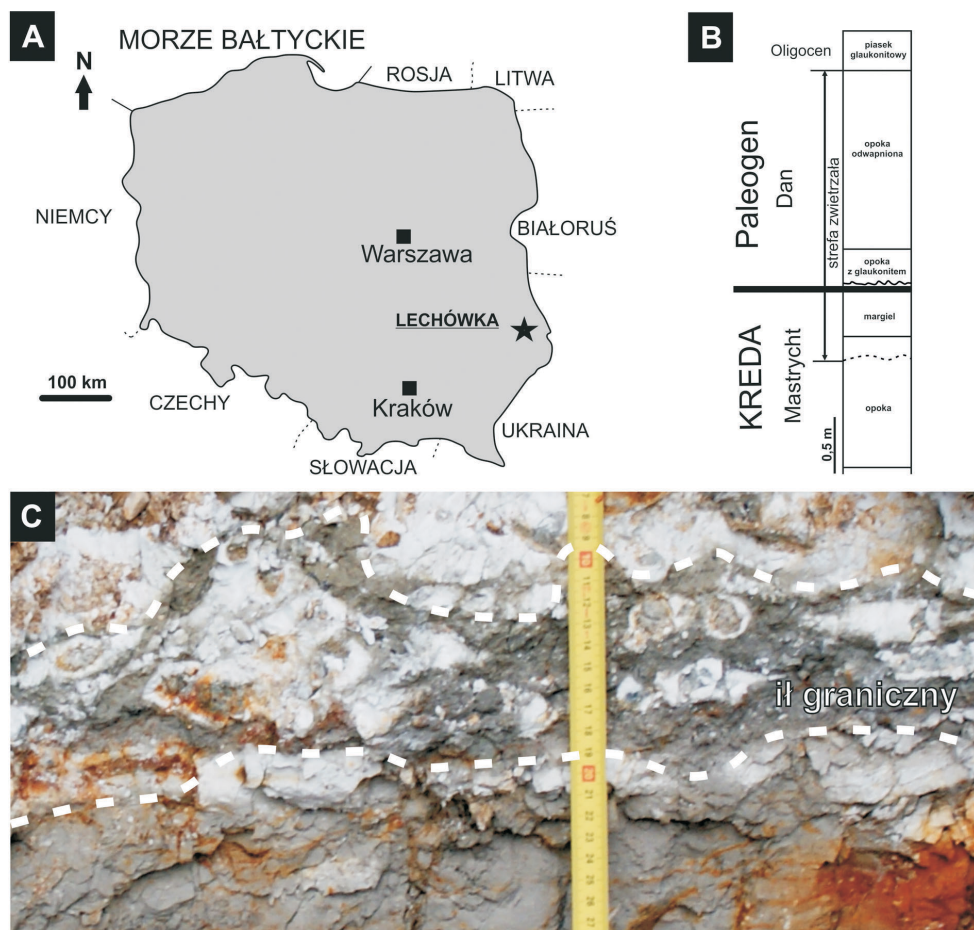


Fig. 1. A) Lokalizacja odsłonięcia skał z pogranicza kredy i paleogenu (K-Pg). B) Uproszczony profil litostatygraficzny osadów z Lechówki. C) Warstwa graniczna iłu z granicy K-Pg, w której znaleziono fragmenty magnetyczne będące pozostałością meteorytu.

- warstwa szarego iłu granicznego (~10 cm) (fig. 1C). Jej spągowa część ma granicę nieregularną, często zafałdowaną z licznymi strukturami typu pograżów. Można w niej dostrzec klasty opoki oraz częste ichnoskamieniałości. To właśnie w tej części zostały znalezione fragmenty meteorytu;
- biały osad (~12–15 cm) reprezentowany przez opokę odwapnioną. W tej części także występują ichnoskamieniałości. Ichnoskamieniałości często wypełnione są glaukonitem;
- biała opoka odwapniona (~40 cm) z przeławiczeniami glaukonitu;
- warstwa opoki odwapnionej (~180 cm);
- warstwa piasku glaukonitowego i żwiru (~40 cm; prawdopodobnie oligocen wg Racki i in. 2011).

Charakterystyka materiału i metod badawczych

Opis próbek

Podczas badania gliny z granicy K-Pg z Lechówki za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) stwierdzono obecność pików należących do magnetytu. Użycie magnesu pozwoliło na wydzielenie większych fragmentów magnetycznych oraz pyłu z badanej próbki iłu (fig. 2). Wydzielone fragmenty miały rozmiary od 2 do 6 mm, a ich całkowita masa wyniosła 0,86385 g. Masa pyłu (>2 mm) to 0,95425 g. Tę masę fragmentów meteorytu uzyskano z ilości około 25 kg iłu granicznego z przestrzeni około 2 m po rozciągłości wychodni. Poza tą strefą nie stwierdzono obecności ziaren magnetycznych.

Fragmenty meteorytu zostały przekazane do Muzeum Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Sosnowcu. Widnieją w spisie katalogowym kolekcji meteorytowej o numerze WNOZ/Mt/87.

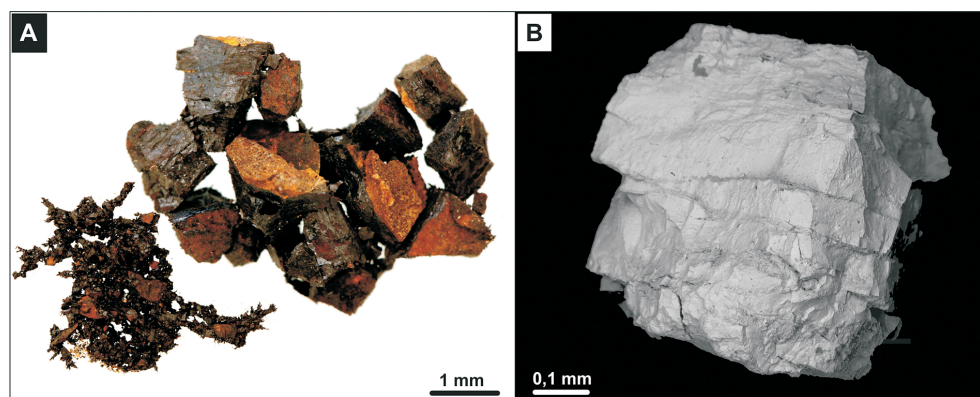


Fig. 2. A) Fotografia znalezionych fragmentów paleometeorytu z Lechówki. B) Obraz BSE przykładowego, magnetycznego fragmentu meteorytu kopalnego z Lechówki.

Mikrosonda elektronowa (EMPA)

Analizy w mikroobszarze zostały wykonane w Międzyinstytutowym Laboratorium Mikroanalizy Mineralów i Substancji Syntetycznych w Warszawie na mikrosondzie CAMECA SX100. Oznaczenia pierwiastków głównych wykonywane były przy warunkach standardowych dla minerałów skałotwórczych: napięcie 15 kV, natężenie 20 nA, czas zliczania 20 s w punkcie analitycznym. Użyte standardy, linie analityczne, kryształy dyfrakcyjne oraz limity detekcji były następujące (wt%): apatyt – P ($K\alpha$, PET, 0.02), rodonit – Mn ($K\alpha$, LIF, 0.02), hematyt – Fe ($K\alpha$, LIF, 0.09), CoO – Co ($K\alpha$, LIF, 0.04), NiO – Ni ($K\alpha$, LIF, 0.03), diopsyd – Si ($K\alpha$, TAP, 0.02), ortoklaz – Al ($K\alpha$, TAP, 0.02) oraz ilmenit – Ti ($K\alpha$, TAP, 0.03).

Dyfrakcja rentgenowska (XRD)

Warunki analityczne ustalono poprzez wykonanie wstępnej analizy korzystając z dyfraktometru rentgenowskiego firmy PANalyticalX'Pert Pro MPD, model Philips PW3040/60, pracującego w geometrii Theta-Theta. Parametry generatora wynosiły 45 kV i 30 mA. Długość fali promieniowania dla anody Cu wynosi dla składowej $K\alpha = 0,1542$ nm. Dane uzyskano w programie komputerowym High-Score+ oraz bazie ICSD. Analizy przeprowadzono dla stałej czasowej równej 300 sekund, przy czym zastosowano krok przesuwu równy $0,01 \theta$, w zakresie od $2,5-65^\circ 2\theta$. Powyższe analizy wykonano na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego.

Wyniki

Z ilu granicznego wyodrębniono magnetyczne fragmenty o dwóch odmiennych frakcjach: 1) 2–6 mm oraz >2 mm (pył meteorytowy). Większe fragmenty są stalowo szare, częściowo przechodzące w odcienie brunatno-brązowe. Frakcja mniejsza jest brązowa. Obserwacje mikroskopowe (mikroskop optyczny oraz SEM) przeciętych, większych magnetycznych fragmentów pozwoliły wyodrębnić dwie strefy, o odmiennej teksturze i składzie mineralnym. Pierwsza z nich zawiera fazy pierwotne. Są one reprezentowane przez minerały o wysokiej zawartości niklu (taenit, kamacyt i schreibersyt). Strefy z metalicznymi minerałami są obrośnięte przez fazy wtórne: magnetyt i goethyt (strefa druga). Zarówno magnetyt i goethyt zawierają podwyższoną zawartość niklu. W badanym materiale nie stwierdzono obecności innych minerałów, które są charakterystyczne dla meteorytów kamiennych (np. oliwiny, pirokseny czy chromity) (Szopa i in. 2017).

Fosforiki

Ze wszystkich stwierdzonych faz pierwotnych, najpospolitszym minerałem jest schreibersyt. Tworzy formy wydłużone, zbliżone do słupkowych lub obcokształtne-ameboidalne (fig. 3A). Ziarna tego minerału sięgają do $100 \mu\text{m}$ długości. Mineral ten w wielu miejscach jest wtórnie zastępowany przez tlenowodorotlenki żelaza wzbogacone w nikiel. Zawartość Ni w schreibersycie zawiera się od 30 do 35 %wag. Średni stosunek Ni do Fe jest stały i wynosi ok. 0,56 (fig. 4).

Fazy metaliczne

Fazy metaliczne w badanym materiale to kamacyt i taenit (fig. 3B). Ich kryształy, tworzą nieregularne formy, które częściowo zastępowane są przez minerały wtórne. Ziarna kamacytu sięgają $30 \mu\text{m}$, jednak najczęściej mają kilka mikrometrów długości. Zawartość Ni waha się od 5,8–6,5 %wag., natomiast Co wynosi od 0,3–0,5 %wag (fig. 5). Rzadszym minerałem od kamacytu jest taenit, którego kryształy sięgają $10 \mu\text{m}$ długości. Tworzy zazwyczaj relikty wydłużonych ziaren, które również rozpadły się do faz wtórnych. Najczęściej jest obrośnięty przez goethyt

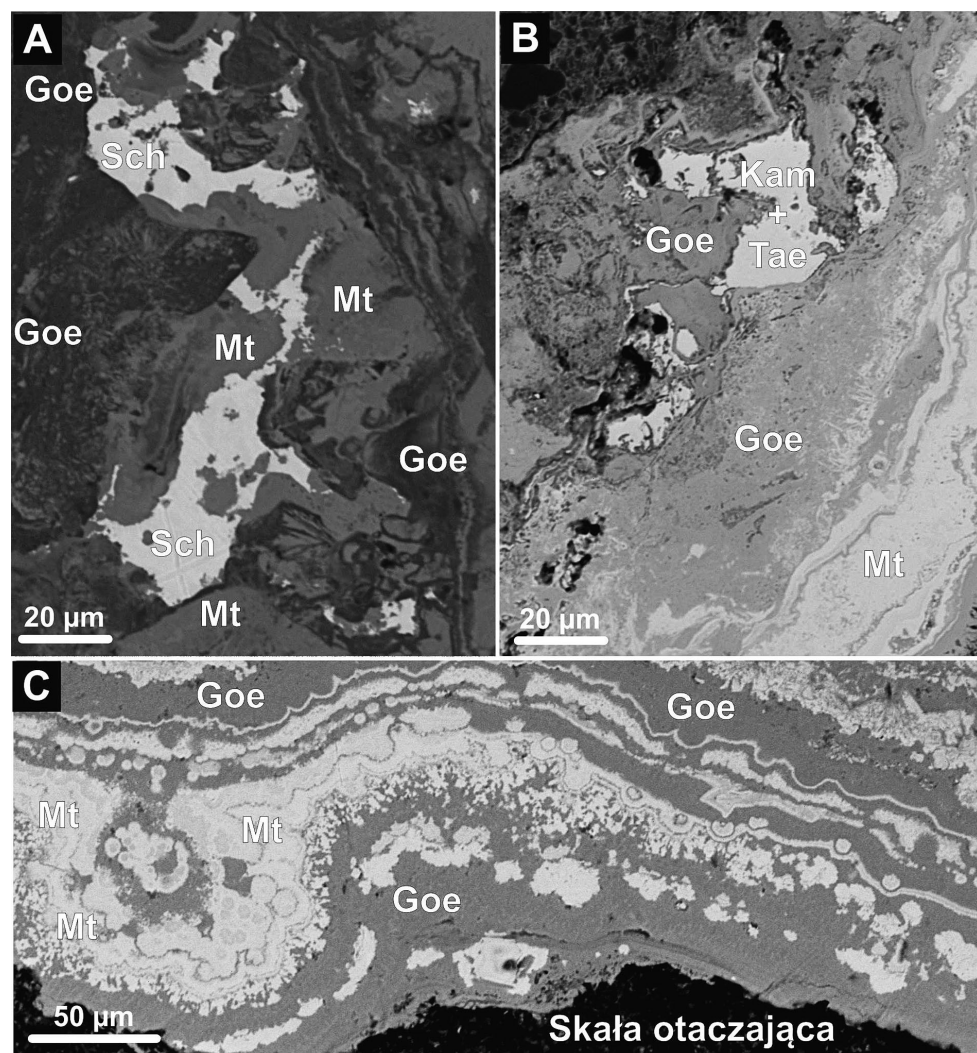


Fig. 3. Przykładowe obrazy BSE przeciętych powierzchni wybranych fragmentów z Lechówki. A) Zdjęcie pokazujące ameboidalną formę schreibersytu. B) Fazy metaliczne obrosnięte przez magnetyt i goethyt. C) Strefa wtórnych minerałów powstałych po pierwotnych fazach meteorytowych. Użyte skróty: Mt – magnetyt, Sch – schreibersyt, Goe – goethyt, Kam – kamacyt, Tae – taenit.

i tlenowodorotlenki żelaza. Zawartość Ni w taenicie sięga 27 %wag. W badanym materiale nie stwierdzono obecności tetrataenitu.

Minerały wtórne

Wszystkie znalezione fazy pierwotne są obrosnięte przez minerały wtórne. Najczęściej, najbliższą fazą na kontakcie z kamacytem, taenitem i schreibersytem jest tlenek żelaza (magnetyt). Większość ksenomorficznej masy znalezionych, magnetycznych fragmentów jest jednak reprezentowana przez tlenowodorotlenki żelaza

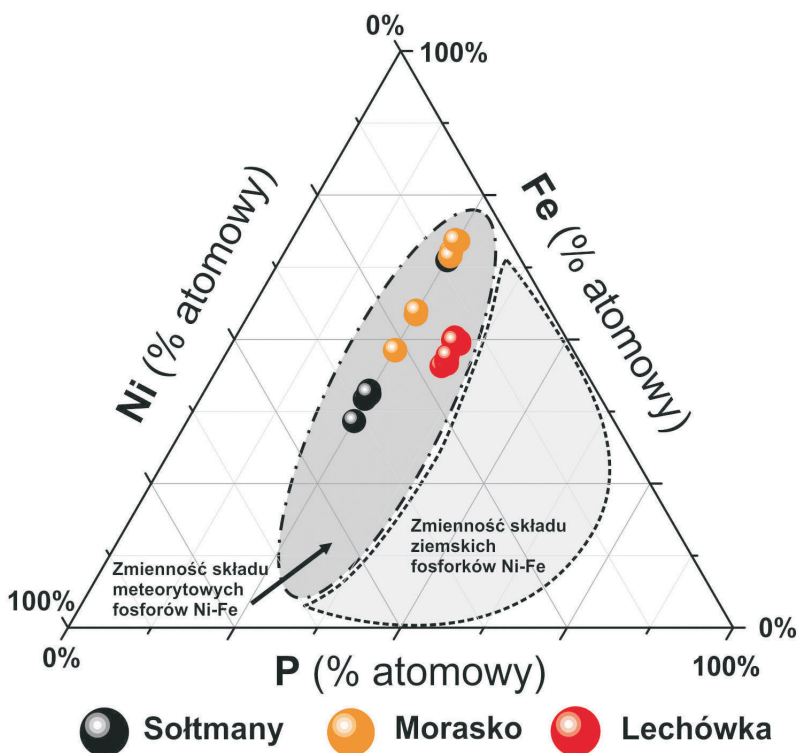


Fig. 4. Pozycja składu chemicznego dla analiz mikrosondowych schreibersytu z Lechówki za Szopa i in. (2017). Dla porównania zamieszczono wybrane analizy dla tego samego mineralu z meteorytów Morasko i Sołtmany (baza danych autorów). Pola dla fosforów Ni i Fe ziemskich i pochodzenia kosmicznego za Britvin i in. (2015).

(fig. 3C). Obydwa minerały zawierają nikiel. Zawartość NiO i CoO w magnetycie, sięga odpowiednio 5,5 %wag oraz 0,5 %wag. Wtórny goethyt i amorficzne tlenowodorotlenki żelaza charakteryzują się obecnością NiO sięgającą do 4,7 %wag. Maksymalna zawartość kobaltu (CoO) wynosi 0,5 %wag.

Dyskusja

Odsłonięcie w Lechówce, z wychodnią skał z granicy K-Pg zawiera pełny zapis biostratygraficzny (Machalski i in. 2016) oraz ma stwierdzoną anomalię zawartości platynowców (PGE) i Ir (Racki i in. 2011). Najwyższa zawartość Ir (9,8 ppb) znajduje się ok 10 cm poniżej ilu granicznego (Racki i in. 2011).

Il graniczny z Lechówki jest głównie zbudowany ze smektytu-nontronitu oraz montmorillonitu z dodatkiem kaolinitu, jasnego lyszczyku, augitu oraz diopsydu. W najniższej części warstwy ilu granicznego zostały znalezione mikrosferule (Brachaniec i in. 2014). Ich wielkość, kształt i skład chemiczny wskazuje na podobieństwo względem sferul opisanych z innych skał granicy K-Pg na całym świecie. Warto jednak zaznaczyć, że w ilu granicznym z Lechówki nie znaleziono minerałów szokowych.

Racki i in. (2011) sugeruje, że stwierdzona anomalia geochemiczna w ile granicznym jest zbieżna względem składu chondrytowego meteorytów. Fakt ten, oraz obecność mikrosferul może wskazywać na ich powiązanie z wydarzeniem Chicxulub, które miało miejsce ok 65 mln temu w Zatoce Meksykańskiej. Impaktorem był najprawdopodobniej chondryt węglisty (CM2) (Kyte 1998; Shukolyukovi Lugmair 1998; Trinquieri in. 2006; Quitté i in. 2003, 2007; Bjärnborgi Schmitz 2013).

Najbliższy Lechówce, znany krater meteorytowy o podobnym wieku znajduje się na Ukrainie. Krater Boltysh ma średnicę 25 km i jest datowany na ok $65,17 \pm 0,64$ mln lat (Kelleyi Gurov 2002, Gurov i in. 2006, Jolley i in. 2010). Jest oddalony ok. 700 km w kierunku S-E od Lechówki. Współczesne badania wskazują, że impaktor odpowiedzialny za utworzenie struktury Boltysh był chondrytem (McDonald i in. 2009). Mając na uwadze powyższe informacje, jakkolwiek korelacja znaleziska w Lechówce z kraterem Boltysh jest mało realistyczna.

Badany materiał ujawnił zawartość minerałów pierwotnych, pochodzenia meteorytowego (taenit, kamacyt, schreibersyt), które przetrwały proces wietrzenia. Jednakże, większość badanych fragmentów magnetycznych uległa całkowitemu zastąpieniu przez wtórne fazy wietrzeniowe. Ponadto, nie znaleziono w przebadanym materiale jakichkolwiek krzemianów czy chromitów, jak również ich częściowych lub całkowitych pseudomorfoz. Taka sytuacja wskazuje, że znalezione fragmenty meteorytu w osadach z Lechówki mogą reprezentować meteoryty żelazny. Skład chemiczny i mineralogiczny, jak również niewielka masa znaleziska uniemożliwiają jego dokładną klasyfikację (Szopa i in. 2017).

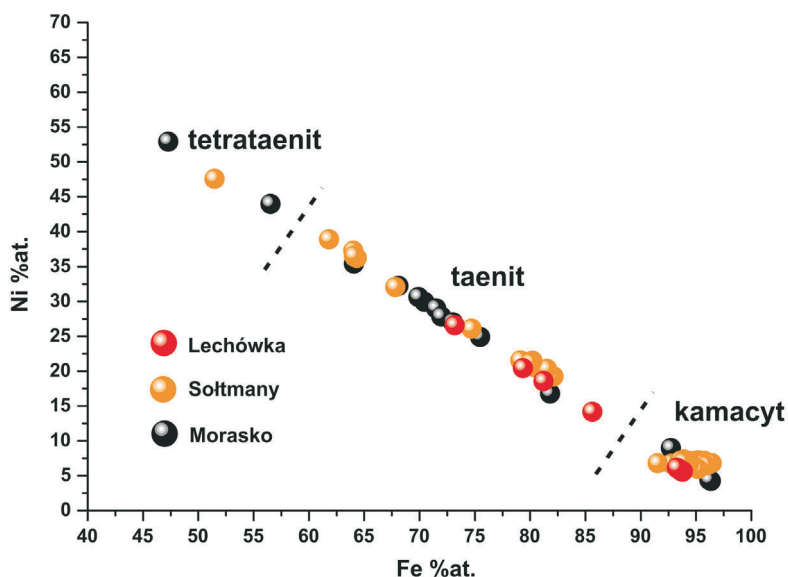


Fig. 5. Zawartość Ni i Fe wyrażona w procentach atomowych w poszczególnych fazach metalicznych stopu NiFe paleometeorytu z Lechówki (dane za Szopa i in. 2016). Dla porównania zamieszczono wybrane analizy dla tych samych faz z meteorytów Morasko i Sołtmany (baza danych autorów).

Wnioski

Meteoryt z Lechówki jest pierwszym (prawdopodobnie żelaznym) meteorytem z granicy kredy i paleogenu na świecie. Pozostałości faz pierwotnych, takich jak taenit, kamacyt i schreibersyt, oraz obecność faz wtórnych wzbogaconych w nikiel (magnetyt, goethyt, tlenowodorotlenki żelaza) potwierdzają na jego pozaziemskie pochodzenie. Ponadto, kopalny meteoryt Lechówka reprezentuje indywidualny i lokalny spadek. Jak dotąd nie stwierdzono żadnej struktury impaktowej, która byłaby wywołana znaleziskiem z Lechówki.

Podziękowania

Projekt dofinansowany został ze środków projakościowych Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) otrzymanych przez Centrum Studiów Polarnych na lata 2014–2018.

Literatura

- Alwmark C., Schmitz B., 2007, *Extraterrestrial chromite in the resurge deposits of the early Late Ordovician Lockne crater, central Sweden*, Earth and Planetary Science Letters, 253, s. 291–303.
- Bogard D.D., 2011, *K–Ar ages of meteorites: clues to parent-body thermal histories*, Chemie der Erde – Geochemistry, 71, s. 207–226.
- Brachaniec T., Karwowski Ł., Szopa K., 2014, *Spherules associated with the Cretaceous-Paleogene boundary in Poland*, Acta Geologica Polonica, 64, s. 99–108.
- Britvin, S.N., Murashko, M.N., Vapnik, Y., Polekhovsky, Y.S., Krivovichev, S.V., 2015. *Earth's Phosphides in Levant and insights into the source of Archean prebiotic phosphorus*, Scientific Reports, 5, s. 8355.
- Buchwald V.F., 1975, *A Handbook of Iron Meteorites*, University of California Press., v. 2, s. 582 i v. 3, s. 1137.
- Cronholm A., Schmitz B., 2010, *Extraterrestrial chromite distribution across the mid-Ordovician Puxi River section, central China: evidence for a global major spike in flux of L-chondritic matter*, Icarus 208, s. 36–48.
- Gurov E.P., Kelley S.P., Koeberl C., Dykan N.I., 2006, *Sediments and impact rocks filling the Boltysh impact crater*, In Biological processes associated with impact events, edited by Cockell C.S., Koeberl C. and Gilmour I., Heidelberg, Springer, s. 335–358.
- Heck P.R., Ushikubo T., Schmitz B., Kita N.T., Spicuzza M.J., Valley J.W., 2010, *A single asteroidal source for extraterrestrial Ordovician chromite grains from Sweden and China: High-precision oxygen three-isotope SIMS analysis*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 74, s. 497–509.
- Jolley D., Gilmour I., Gurov E., Kelley S., Watson J., 2010, *Two large meteorite impacts at the Cretaceous-Paleogene boundary*, Geology, 38, s. 835–838.
- Kelley S.P., Gurov E., 2002, *Boltysh, another impact at the KT boundary*, Meteoritics & Planetary Science, 37, s. 1031–1043.
- Kyte F.T., 1998, *A meteorite from the Cretaceous/Tertiary boundary*, Nature, 396, s. 237–239.
- Lapaz L., 1953, *Preliminary note on the Lake Murray, Carter County, Oklahoma, Siderite (CN=+0970.341)*, Meteoritics & Planetary Science, 1, s. 109–113.
- Lindskog A., Schmitz B., Cronholm A., Dronov A., 2012, *A Russian record of a Middle Ordovician meteorite shower: extraterrestrial chromite at Lynna River, St. Petersburg region*, Meteoritics & Planetary Science, 47, s. 1274–1290.

- Machalski M., Vellekoop J., Dubicka Z., Peryt D., Harasimiuk M., 2016, *Late Maastrichtian cephalopods, dinoflagellate cysts and foraminifera from the Cretaceous-Paleogene succession at Lechówka, southeast Poland: Stratigraphic and environmental implications*, Cretaceous Research, 57, s. 208–227.
- Maier W.D., Andreoli M.A.G., McDonald I., Higgins M.D., Boyce A.J., Shukolyukov A., Lugmair G.W., Ashwal L.D., Gräser P., Ripley E.M., Hart R.J., 2006, *Discovery of a 25-cm asteroid clast in the giant Morokweng impact crater, South Africa*, Nature, 441, s. 203–206.
- McDonald I., Bartosova K., Koeberl C., 2009, *Search for a meteoritic component in impact breccia from the Eyreville core, Chesapeake Bay impact structure: Considerations from platinum-group element contents*. In *The ICDP-USGS Deep Drilling Project in the Chesapeake Bay Impact Structure: Results from the Eyreville Core Holes*, edited by Gohn G.S., Koeberl C., Miller K.G. and Reimold W.U. Colorado: Geological Society of America, s. 469–479.
- Racki G., Machalski M., Koeberl C., Harasimiuk M., 2011, *The weathering-modified iridium record of a new Cretaceous–Paleogene site at Lechówka near Chełm, SE Poland, and its palaeobiologic implications*, Acta Palaeontologica Polonica, 56, s. 205–215.
- Schmitz B., 2013, *Extraterrestrial spinels and the astronomical perspective on Earth's geological record and evolution of life*, Chemie der Erde – Geochemistry, 73, s. 117–145.
- Schmitz B., Tassinari M., Peucker-Ehrenbrink B., 2001, *A rain of ordinary chondritic meteorites in the early Ordovician*, Earth and Planetary Science Letters, 194, s. 1–15.
- Schmitz B., Häggström T., Tassinari M., 2003, *Sediment-dispersed extraterrestrial chromite traces a major asteroid disruption event*. Science, 300, s. 961–964.
- Schmitz B., Alwmark C., Cronholm A., Tassinari M., 2009, *The breakup of the L-chondrite parent body and its signature in Ordovician sediments – an update*, Meteoritics & Planetary Science 44 (Suppl.): A21.pdf.
- Schmitz B., Harper D.A.T., Peucker-Ehrenbrink B., Stouge S., Alwmark C., Cronholm A., Bergström S.M., Tassinari M., Xiaofeng W., 2008, *Asteroid breakup linked to the Great Ordovician Biodiversification Event*, Nature Geoscience, 1, s. 49–53.
- Schmitz B., Huss G.R., Meier M.M.M., Peucker-Ehrenbrink B., Church R.P., Cronholm A., Davies M.B., Heck P.R., Johansen A., Keil K., Kristiansson P., Ravizza G., Tassinari M., Terfelt F., 2014, *A fossil winonaite-like meteorite in Ordovician limestone: A piece of the impactor that broke up the L-chondrite parent body?* Earth and Planetary Science Letters, 400, s. 145–152.
- Schmitz B., Peucker-Ehrenbirk B., Tassinari M., 1997, *Acretion rates of meteorites and cosmic dust in the early Ordovician*, Science, 278, 88–90.
- Shukolyukov G., Lugmair W., 1998, *Isotopic evidence for the Cretaceous-Tertiary impactor and its type*, Science, 282, s. 927–930.
- Swindle T.D., Kring D.A., Weirich J., 2014, *^{40}Ar - ^{39}Ar ages of impacts involving ordinary chondrite meteorites*, in: *Advances in ^{40}Ar / ^{39}Ar Dating: from Archaeology to Planetary Sciences*, edited by Jourdan F., Mark D.F., Verati C. London: Geological Society of London. s. 333–347.
- Szopa K., Brachaniec T., Karwowski Ł., Krzykowski T., 2017, *Remnants of altered meteorite in the Cretaceous-Paleogene clay boundary in Poland*, Meteoritics & Planetary Science, w druku.
- Tassinari M., Schmitz B., Löfgren A., 2004, *The first fossil meteorite from the mid-Ordovician of the Gullbögen quarry, Billingen, southern Sweden*, GFF, 126, s. 321–324.
- Thorslund P., Wickman F.E., Nyström J.O., 1984, *The Ordovician chondrite from Brunflo, central Sweden. I. General description and primary minerals*, Lithos, 17, s. 87–100.