

Mieszko KOŁODZIEJ¹, Andrzej MUSZYŃSKI², Bogdan IDZIKOWSKI¹

Meteoryt Morasko – nowe badania mineralogiczne

The Morasko Meteorite – a new mineralogical investigations

Abstract: The Morasko Meteorite nature reserve is located in Morasko, on the northern edge of the city of Poznań, Poland. In this area the biggest known in Central Europe iron meteorite fall occurred. New mineral phases Moraskoite $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)\text{F}$ and Czochralskiite $\text{Na}_4\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)_4$ have been discovered in the Morasko Meteorite. Both are phosphates, which exist as a parts of nodules – oval inclusions which occur in some iron meteorites, including the Morasko Meteorite.

This paper describes the results of our investigation on nodules separated from the Morasko meteorite. Among others, the silicates in form of pyroxene from clinoenstatite group and olivines from forsterite group were found. The presence of phosphates in the form of merrillites was confirmed by electron microprobe analyser. In the metallic parts, on contact between kamacite and taenite crystals, rims (lammelas) composed of tetrataenite were detected. This phase is known to have hard-magnetic properties and could be used as cheaper equivalent for commonly used compounds based on rare earth elements for permanent magnets production.

Keywords: iron meteorite, chemical analysis, nodules, tetrataenite, hard-magnetic phases

Wstęp

W Wielkopolsce, pod Poznaniem leży wieś Morasko, której tereny do dzisiaj noszą wyraźne ślady zdarzenia sprzed około 5000 lat – spadku największego „deszczu” meteorytów żelaznych w Europie Środkowej. Dla wielu naukowców i kolekcjonerów rejon Moraska jest wciąż perspektywiczny nie tylko ze względu na duże prawdopodobieństwo znalezienia kolejnych metalicznych fragmentów, ale także identyfikacji w ich wnętrzu rzadko spotykanych minerałów lub odkrycia nieznanych do tej pory związków chemicznych. Przez przeszło sto lat zebrano ponad trzy tony materii meteorytowej. Pierwszy fragment został przypadkowo znaleziony 12 listopada 1914 roku przez Franza Coblinera podczas tworzenia umocnień wojskowych w północnej części obecnego rezerwatu przyrody „Meteo-

¹ Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk, M. Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań; e-mail: mieszko.kolodziej@ifmpan.poznan.pl

² Instytut Geologii Uniwersytetu A. Mickiewicza w Poznaniu, B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań

ryt Morasko” (Classen 1978). Do dzisiaj, w tym rezerwacie można oglądać pozostałości po okopach stacjonujących tu ponad sto lat temu żołnierzy, którzy jako pierwsi wydobyli około 70 kilogramowy fragment tej pozaziemskiej materii. Po II wojnie światowej poszukiwania rozpoczął Jerzy Pokrzywnicki. Przeprowadził on bardzo szeroki wywiad środowiskowy, co pozwoliło mu na odnalezienie kilkudziesięciu meteoratów, z których największy ważył 78 kg. Zwrócił on także uwagę na występujące na terenie Moraska okrągłe zagłębienia, które powiązał z spadkiem większej liczby meteoratów. Hipoteza ta została potwierdzona i obecnie trwają prace mające na celu ustalenie kierunku lotu oraz kąta pod jakim fragmenty meteorytu uderzyły w powierzchnię Ziemi (Muszyński i in. 2012; Bronikowska i in. 2015; Walesiak i in. 2017). W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wzniesiono na szerszą skalę poszukiwania materii meteorytowej. Wydobyto wówczas m.in. fragmenty ważące 56 kg i ponad 70 kg (znalazcą był Henryk Nowacki) oraz 51 kg okaz zlokalizowany przez Aleksandra Gehlera, Thomasa Kurtza i Matthiasa Kurtza. Następne wielkie znalezisko miało miejsce dopiero w roku 2006, gdy Krzysztof Socha pozyskał ważący 164 kg fragment meteorytu. Otrzymał on nazwę „Rudy”. Rekord ten nie utrzymał się zbyt długo bo w roku 2012 Magdalena Skirzewska i Łukasz Smuła znaleźli ważący ponad 261 kg fragment pozaziemskiej materii i znalezisko nazwali „Memors”. Ale i ten rekord został pobity. Dokładnie pięć lat później Michał Nebelski wraz z Andrzejem Owczarakiem zlokalizowali i wykopali okaz, który jest największym znanym fragmentem meteorytu Morasko. Nazwali go „Kruszynka” – jej masa po oczyszczeniu ze zgorzeliny przekracza 271 kg.

Meteority kryją w sobie zapis zdarzeń, których nie możemy zaobserwować na naszej planecie nawet w warunkach laboratoryjnych, np. widzimy w nich konsekwencje bardzo powolnego stygnięcia płynnej materii (m.in. stopu żelazowo-niklowego) czy zderzeń asteroid między sobą. Nasze badania mają na celu sprawdzenie czy w meteorycie Morasko występują nieopisane dotychczas minerały, a także, czy zawiera on większe ilości tetrataenitu (twarda magnetycznie faza FeNi), którego synteza konwencjonalnymi metodami nie przynosi dotychczas zadowalających rezultatów.

Krótką historia badań

Skutki impaktu meteorytu Morasko, jego skład chemiczny i struktura krystaliczna dokumentowane były już w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego stulecia (Pokrzywnicki 1955, 1964). Opracowania te przytaczały także istniejące opisy wcześniejszych badań. Meteoryt Morasko zaklasyfikowano wstępnie jako typ pośredni między bardzo grubokrystalicznym oktaedrytem brekcjonowanym a heksaedrytem brekcjonowanym. Bardzo szczegółowy opis z roku 1975, autorstwa Vagna Fabritusa Buchwalda, znajduje się również w „encyklopedii” meteoratów „*Handbook of Iron Meteorites*”, gdzie sklasyfikowano go jako oktaedryt gruboziarnisty bogaty w inkluzje (Og). Rok później meteoryt Morasko i teren jego upadku opisano w obszernej pracy dotyczącej zagadnień geomorfologicznych

i mineralogicznych (Hurnik, 1976). Wykonano także badania palinologiczne, które pozwoliły na określenie daty spadku meteorytu na około 5000–5400 lat BP. (Hurnik i in., 1976). Pierwsze dokładniejsze badania nodul występujących w meteorycie Morasko, a także deformacji minerałów pod wpływem ciśnienia zostały wykonane przez Bognę Dominik w latach 1972–1977 (Dominik 1972; Dominik i in. 1974; Dominik 1974, 1975, 1976, 1977). Kolejne raporty z badań nad meteorytem Morasko pochodzą z roku 1999 i zawierają rezultaty analiz chemicznych, mineralogicznych i strukturalnych, tj. mechaniczne zblźniaczenia oraz pęknięcia, symulacje ciśnień towarzyszących impaktowi, a także opisy historii pozyskiwania różnych jego fragmentów (Pilski i in. 1999). Dokładniejsze badania dotyczące składu mineralnego żelaznego „przybysza” oraz skutków jego upadku w miękkie osady rozpoczęły się dopiero po roku 2000. Do dzisiaj powstało wiele prac zarówno mineralogicznych, jak i dokumentujących różne analizy struktury krystalicznej meteorytu (Stankowski i in. 2002; Idzikowski i in. 2010; Karwowski i in. 2011; Muszyński i in. 2012; Pilski i in. 2013), czy jego morfologii, jak również genezę ukształtowania terenu zmienionego na skutek zderzenia dużych fragmentów kosmicznej materii z powierzchnią naszej planety (Stankowski i in. 2008; Szokaluk i in. 2015). Podjęto także próby modelowania wielkości meteorytu oraz jego prędkości w momencie kolizji z Ziemią (Bronikowska i in. 2017). Należy także wspomnieć, że niedawno w meteorycie Morasko odkryto istnienie dwóch nieznanych wcześniej minerałów. Są to moraskoit (Karwowski i in. 2015) oraz czochralskiit (Karwowski i in. 2016).

Geneza powstania meteorytu Morasko

Można sądzić, że meteoryt Morasko jest częścią jądra planetoidy, która w przeszłości została rozbita, np. w wyniku kolizji z inną planetoidą. Fragmenty materii poruszające się po orbitach między Marsem a Jowiszem (główny pas planetoid) sugerują istnienie w odległej przeszłości znacznie większych obiektów niż obserwowane obecnie. Pozostałościami po ich wzajemnych zderzeniach są występujące tu bardzo licznie asteroidy. Porównanie składów chemicznych różnorodnych meteorytów i składu naszej planety prowadzi do wniosku, że meteoryty kamienne są podobne w swej budowie do skał płaszczka i skorupy ziemskiej, meteoryty kamienno-żelazne do ciągle mieszących się skał obecnych między płaszczem i jądrem zewnętrznym, a meteoryty żelazne do jej jądra. W pracy Kleine i in. (2005) opisywana jest hipoteza powstawania meteorytów z grupy IAB – są to najwcześniej uformowane jądra planetoid – i zdaje się ona być trafną dla meteorytu Morasko. Jednakże anomalnie niskie koncentracje złota i irydu (Pilski i in. 2013) sugerują, że meteoryt Morasko ulegał stopniowej dyferencjacji, a występujący w nim tetracenylen potwierdza, że stygnięcie meteorytu Morasko podczas formowania musiało być bardzo powolne i nie było szybsze niż kilka stopni na milion lat. Nie do końca została wyjaśniona przyczyna powstawania nodul grafitowo-troilitowych. Jedną z prac (Luecke i in. 2006) zakłada, że są to krystalizujące jako pierwsze strefy, które podczas stygnięcia płynnego stopu kumulują w sobie pierwiastki chalkofilne.

Następnie krystalizuje taenit, który przekształca się stopniowo w kamacyt (a następnie w tetrataenit), czego skutkiem jest występowanie figur Widmanstättena. Trafna sugestia dotycząca przyczyn powstania nodul grafitowo-troilitowych została podana przez Wassona i Kallemyna (2002). Twierdzą oni, że słaba rozpuszczalność siarki w stopie żelazowo-niklowym spowodowała wytworzenie się stref grafitowo-troilitowych. W zewnętrznych częściach inkluzji tworzą się obwódki schreibersytowo-cohenitowe, których grubość nie przekracza kilku milimetrów. Takie struktury zaobserwowano także we fragmentach meteorytu Morasko. Wiek większości meteorytów znalezionych na Ziemi szacowany jest na 4,4–4,6 miliarda lat (Bottke i in. 2005). Dotyczy to także meteorytu Morasko, który uformował się około 4,5 miliarda lat temu. Wiek 26 innych meteorytów z grupy IAB także mieści się w tym przedziale czasu (Benedix i in. 2000). Oszacowanie czasu powstania inkluzji znajdujących się wewnątrz meteorytów wykonuje się metodą potasowo-argonową (K-Ar). Pomiar polega na sprawdzeniu w skale lub mineralu zawartości izotopu ^{40}Ar , który powstał z rozpadu promieniotwórczego ^{40}K (Bogard i in. 1968). Znając czas połowicznego rozpadu tego izotopu można precyzyjnie określić czas, w którym uformowała się dana skała czy minerał.

Metody badawcze

Z fragmentów meteorytu Morasko zostały wycięte nodule wybrane do badań, a ich powierzchnia została zeszlifowana i wypolerowana. Do obserwacji morfologii powierzchni meteorytów posłużył mikroskop optyczny Zeiss® SteREO Discovery V.8, umożliwiający ośmiokrotne powiększenia. Do analizy składu chemicznego metodą półilościową użyto mikroskopu elektronowego Hitachi S-3700N z analizatorem dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS – *energy dispersive X-ray spectroscopy*) Noran SIX. Do wyznaczenia składu chemicznego metodą ilościową wykorzystano mikrosondę elektronową CAMECA SX 100, wyposażoną w cztery analizatory długości fal (WDS – *wavelength-dispersive spectrometers*). Umożliwia ona określenie zawartości pierwiastków w polu o średnicy około 1 mm. Urządzenie to znajduje się w Międzyinstytutowym Laboratorium Mikroanalizy Mineralów i Substancji Syntetycznych Uniwersytetu Warszawskiego. Do syntezy próbek metalicznych meteorytu z niklem posłużył piec łukowy MAM-1 firmy E. Buehler GmbH., przeznaczony do topienia próbek o masach od 2 do 20 g. Do wytworzenia metastabilnych stopów w postaci taśm posłużył „melt-spinner” SC firmy E. Buehler GmbH. z kołem miedzianym o średnicy 200 mm. W celu analizy właściwości magnetycznych badanych próbek posłużono się zestawem przyrządów do pomiaru właściwości fizycznych (PPMS – *physical property measurement system*) z magnetometrem wibracyjnym (VSM – *vibrating sample magnetometer*). Temperatury przemian fazowych wyznaczono w trybie izochorycznym w skaningowym kalorymetrze różnicowym Netzsch DSC 404. Zakres pracy urządzenia mieści się w temperaturach od pokojowej do około 1500°C. Do analizy struktury krystalicznej stopów wykorzystywano dyfraktometr rentgenowski

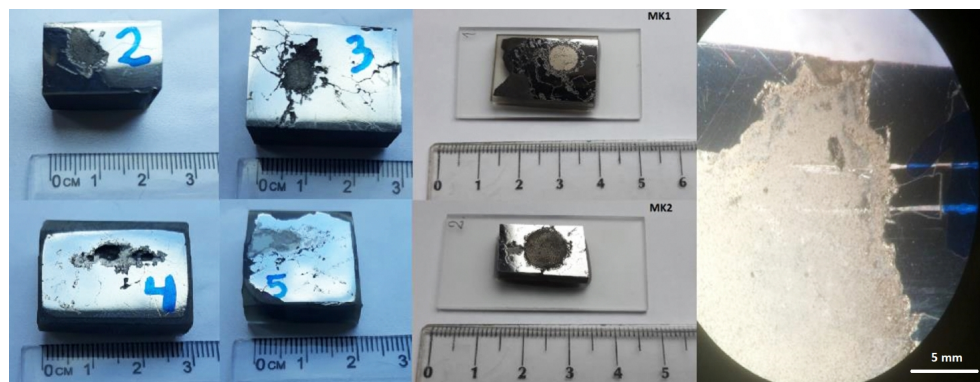
TUR M-62 pracujący w geometrii Bragg-Brentano z lampą kobaltową Co-K , wyposażony w goniometr HZG 4.

Charakterystyka fizykochemiczna nodul

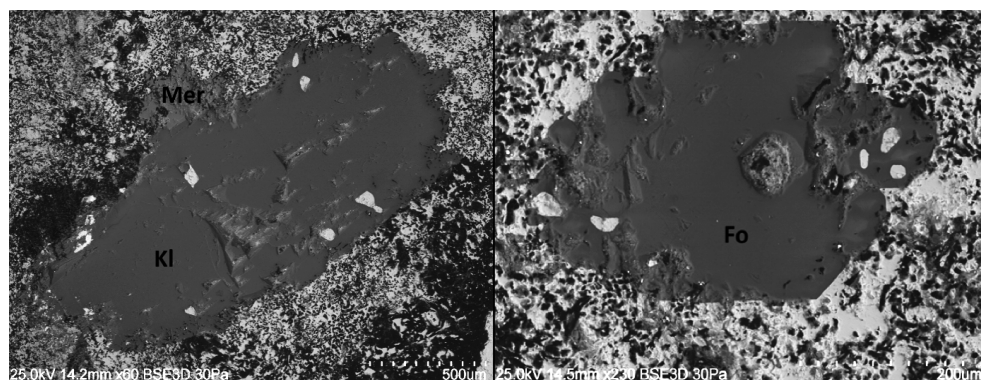
W meteorycie Morasko znajdują się liczne owalne inkluzje zwane nodulami, zbudowane w wewnętrznej części głównie z troilitu i grafitu, a na zewnątrz z obwódek schreibersytowo-cohenitowych. Obserwacja mikroskopem optycznym ujawniła drobne, ale niezwykle interesujące wytrącenia innych minerałów. Niektóre z nich przepuszczały światło, co pozwoliło wstępnie przypuszczać, że są to najprawdopodobniej krzemiany. Zdjęcia wykonane skaningowym mikroskopem jednoznacznie potwierdziły ich występowanie w badanych próbkach. Stwierdzono także obecność trzech mocno spękanych minerałów, które zawierają wapń, sód, potas, fosfor i tlen. Była to kolejna przesłanka świadcząca o możliwości znalezienia w meteorycie Morasko nowych minerałów. Odkryte w roku 2013 i opisane w roku 2015 (moraskoit) i 2016 (czochralskiit) to nieznanne dotąd fosforany, składające się właśnie z tych pierwiastków. Analiza przy użyciu mikrosondy elektronowej ujawniła obecność fazy merrillitowej (ryc. 2, 3). Analizowane krzemiany zobrazowane na rycinach 1 i 2 to oliwiny z grupy forsterytu (90–94% wag. części Mg, 6–10% wag. części Fe) oraz pirokseny z grupy klinoenstatytu (80–90% wag. części Mg, 10–20% wag. części Fe i 0–5% wag. części Ca).

Istnienie nodul, zbudowanych z grafitu i troilitu i części metalicznej, składającej się z kamacytu i taenitu, świadczą o dwóch odmiennych środowiskach geochemicznych istniejących podczas formowania się stopu meteorytowego. Skład chemiczny nodul jest charakterystyczny dla środowiska chalkofilnego, w którym występują pierwiastki o większym powinowactwie do siarki niż do tlenu.

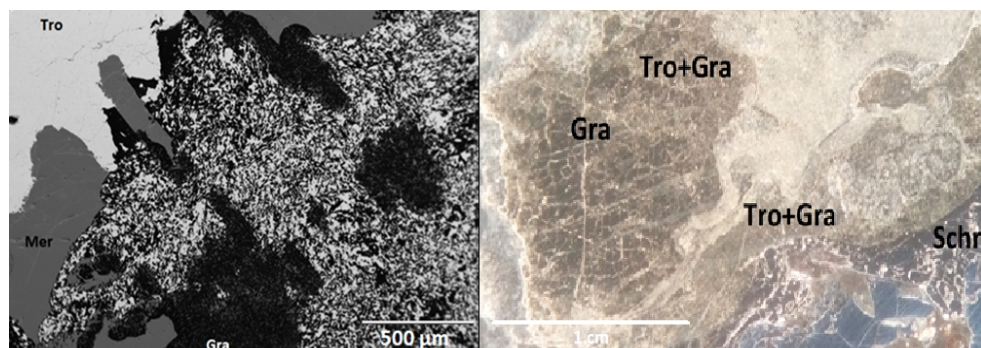
Wyniki analizy ilościowej zawartości pierwiastków chemicznych w troilicie przy użyciu mikrosondy elektronowej zostały przedstawione w tabeli 1. W jego składzie odnotowano srebro i chrom.



Ryc. 1. Nodule wycięte z różnych fragmentów meteorytu Morasko. Po prawej stronie zdjęcie z mikroskopu optycznego noduli zawierającej krzemiany – czarny kryształ w środku to klinoenstatyt widoczny również na rycinie 2.



Ryc. 2. Zdjęcia krzemianów występujących w nodulach meteorytu Morasko wykonane skaningowym mikroskopem elektronowym – obrazowanie z wykorzystaniem elektronów wstecznie rozproszonych (BSE – *backscattered electrons*). Po lewej stronie – kryształ kluweinstatytu (KI) oraz przyległy do niego kryształ merrillitu (Mer) w noduli grafitowo (obszary ciemnoszare) – troilitowej (obszary jasnoszare). Po stronie prawej – kryształ forsterytu (Fo) w otoczce grafitowo (obszary ciemnoszare) – troilitowej (obszary jasnoszare). W obu krzemianach widoczne są także inkluzje troilitowe (obszary jasnoszare).



Ryc. 3. Zdjęcia nodul (po lewej stronie) ze skaningowego mikroskopu elektronowego – obrazowanie z wykorzystaniem elektronów wstecznie rozproszonych (BSE – *backscattered electrons*). Na zdjęciu z lewej strony kryształy merrillitu (Mer, obszary szare), troilitu (Tro, jasnoszare) oraz grafitu (Gra, ciemnoszare) w noduli grafitowo (obszary ciemnoszare) – troilitowej (obszary jasnoszare). Po prawej stronie nodula grafitowo – troilitowa (zdjęcie z mikroskopu optycznego).

Tabela 1. Uśredniony wynik (dokładność pomiaru $\pm 0,01\%$) zawartości pierwiastków (% wag.) w kryształach troilitu, występującego w nodulach meteorytu Morasko. Pomiar przeprowadzono z użyciem mikrosondy elektronowej CAMECA SX 100 z czterema analizatorami długości fal (WDS – *wavelength-dispersive X-ray spectrometers*).

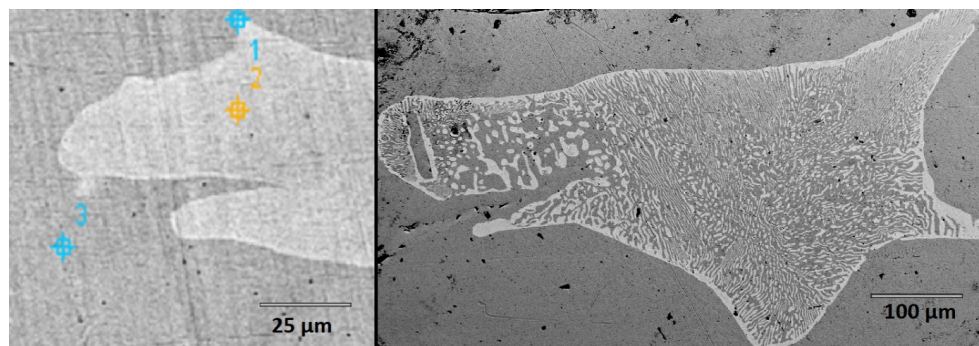
S	Fe	Ni	P	Ca	Si	Cu	Ag	Cr	suma (% wag.)
37,05	62,59	0,01	0,02	0,01	<0,01	0,04	0,06	0,20	99,98

Charakterystyka metalicznej części meteorytu

Pozornie jednolita powierzchnia zglądów meteorytu Morasko zbudowana jest z dwóch przeplatających się minerałów – kamacytu i taenitu. Akcesorycznie występują w niej także schreibersyt i cohenit. Mikroskop elektronowy pozwolił zaobserwować także obecność plessytów. Są to mieszaniny kamacytu i taenitu o mikroskopijnych rozmiarach. Wyniki badań przy użyciu mikrosondy elektronowej potwierdziły, że plessyty utworzone są nie z dwóch, a z trzech minerałów – kamacytu, taenitu oraz z rzadko spotykanego tetrataenitu. Pozwoliły także zaobserwować kryształy taenitu, które na granicy taenit–kamacyt zawierały zdecydowanie więcej niklu niż w przypadku kamacytu czy taenitu. Stosunek atomowy Ni do Fe wynosi 1:1, co sugeruje, że najprawdopodobniej tworzą tetrataenit. Ten twardy magnetycznie związek międzymetaliczny jest perspektywiczny dla nauki i przemysłu. Dwa metale przejściowe tworzą materiał o strukturze tetragonalnej $L1_0$, który może stanowić tani zamiennik do produkcji magnesów trwałych, bazujących obecnie na pierwiastkach ziem rzadkich, takich jak samar czy neodym. Układy twarde magnetycznie wykazują znaczne namagnesowanie szczątkowe (remanencję) po wyłączeniu zewnętrznego pola magnetycznego. Charakteryzują się także silnym polem koercji, które definiowane jest jako zewnętrzne pole magnetyczne, którego przyłożenie powoduje spadek namagnesowania do zera. Obecność tetrataenitu w meteorytach żelaznych umożliwia wnioskowanie o ich petrogenезie. Faza ta przekształca się bowiem bardzo szybko w temperaturze bliskiej temperatury Curie (560°C) w fazę wysokotemperaturową -FeNi (Bordeaux 2015), co oznacza, że podczas przelotu meteorytu przez atmosferę nie uległ on znacznemu podgrzaniu (poza skorupą obtopieniową). Natomiast obecność tetrataenitu świadczy o powolnym tempie stygnięcia początkowo płynnego meteorytu w czasie jego krystalizacji



Ryc. 4. Zgląd metalograficzny meteorytu Morasko (fragment z kolekcji Michała Nebelskiego nazwany „Żelazko”) – widoczne figury Widmanstättena zbudowane z kamacytu (obszary metaliczne), taenitu (niewidoczne gołym okiem) oraz schreibersytu (ciemniejsze, metaliczne). Czarne „beleczki” to kryształy cohenitu.



Ryc. 5. Zdjęcia powierzchni metalicznej części meteorytu Morasko ze skaningowego mikroskopu elektronowego – obrazowanie z wykorzystaniem elektronów wstecznie rozproszonych (BSE – *backscattered electrons*). Po lewej stronie monokryształ taenitu (jasnoszary, 2) w kryształach kamacytu (ciemnoszary, 3). Bardzo wyraźnie widoczna jest obwódka zbudowana z tetrataenitu (najjaśniejsza, prawie biała, 1). Po prawej stronie plessytu kamacytowo-taenitowy. Analiza przy pomocy mikrosondy elektronowej potwierdziła obecność fazy $L1_0$ -FeNi, czyli tetrataenitu (obszar jasnoszary, prawie biały).

w przestrzeni kosmicznej. Oznacza to, że meteoryt Morasko był częścią planetoidy mniejszej niż Ziemia, ale także zbudowanej ze skorupy i metalicznego jądra, które w przeszłości uległy rozpadowi. Tetrataenit występuje najczęściej na granicy kamacytu-taenitu (ryc. 5), co świadczy o tym, że wyseparowuje się z taenitu. Zwykle jego koncentracje są bardzo małe, a jego zawartość w meteorycie Morasko nie przekracza dziesiątych części procenta. Większe koncentracje tetrataenitu są charakterystyczne dla ataksytów, znacznie wzbogaconych w nikiel. W jednej z badanych próbek faza $L1_0$ -FeNi występuje jako główna frakcja widocznego na rycinie 5 (prawa strona) plessytu. W kryształach tetrataenitu zaobserwowano także wyższą koncentrację miedzi oraz niższą zawartość kobaltu w porównaniu do kryształów kamacytu i taenitu. Wyniki analizy chemicznej tych minerałów zostały przedstawione w tabeli (tab. 2). Część metaliczna meteorytu Morasko w odróżnieniu od nodul reprezentuje środowisko syderofilne w którym występują pierwiastki wykazujące znaczną rozpuszczalność w stopach żelaza.

Tabela 2. Uśrednione wyniki (dokładność pomiaru $\pm 0,01\%$) analizy ilościowej składu chemicznego (% wag.) wybranych minerałów z metalicznej części meteorytu Morasko, uzyskane przy użyciu mikrosondy elektronowej z czterema analizatorami długości fal (WDS – *wavelength-dispersive X-ray spectrometers*).

	P	S	Fe	Co	Ni	Cu	suma (% wag)
kamacyt	0,05	<0,01	93,45	0,66	6,02	–	100,18
	0,05	0,01	91,42	0,41	7,08	0,23	99,2
taenit	0,02	0,01	58,61	0,06	39,16	0,31	98,17
	0,01	0,01	65,17	0,23	34,93	0,29	100,64
	<0,01	<0,01	64,92	0,12	32,95	0,28	98,27
tetrataenit	0,01	0,01	50,46	0,07	50,23	0,43	101,21
	–	–	55,11	0,1	43,14	0,31	98,66

Właściwości magnetyczne meteorytu Morasko

Pierwsze badania magnetyzmu meteorytu Morasko zostały wykonane dopiero w ostatnich latach (Idzikowski i in. 2010). Podjęto również próby wytworzenia fazy $L1_0$ -FeNi metodą schładzania ciekłego stopu z fazy ciekłej (*melt spinning*). W tym celu wykorzystano materię meteorytową, którą domieszkowano niklem, gdyż meteoryty zawierające zdecydowanie więcej niklu (ataksyty) zawierają także o wiele więcej tetrataenitu. Analiza krzywych kalorymetrycznych (badania w różnicowym kalorymetrze skaningowym DSC – *differential scanning calorimetry*) wykazała, że w temperaturach między 320 i 360°C zachodzi przemiana, której towarzyszy nieznaczne wydzielanie ciepła (reakcja egzotermiczna). Może to dowodzić wytrącania się kryształów $L1_0$ -FeNi. Nie zostało to jednak potwierdzone w badaniach dyfraktometrem rentgenowskim z powodu małej koncentracji tego związku w całej objętości próbki lub zbyt niskiej czułości tej metody pomiarowej. Zaobserwowano jedynie obecność γ -FeNi oraz δ -FeNi. Warto wspomnieć, że próby wytworzenia tetrataenitu w ilościach przemysłowych są ciągle podejmowane przez wiele jednostek badawczych na świecie.

Podsumowanie

Meteoryt Morasko jest meteorytem żelaznym zaklasyfikowanym ze względu na zawartości pierwiastków śladowych (Ir, Au) do grupy IAB. Strukturalnie jest oktaedrytem gruboziarnistym. Szacuje się, że jego wejście w atmosferę Ziemi nastąpiło około 5000–5500 lat temu.

Metaliczna część meteorytu zbudowana jest głównie z kamacytu, taenitu, schreibersytu i cohenitu. Wykazano także występowanie tetrataenitu. Nodule zbudowane są z grafitu i troilitu. Posiadają one zewnętrzną otoczkę, która składa się z schreibersytu i cohenitu. Jako minerały akcesoryczne zaobserwowano także oliwiny (forsteryt), pirokseny (klinoenstatyt) i merrillity. W nodulach licznie obecnych w meteorycie Morasko odkryto dwa nieznane dotąd minerały – czochralskiit i moraskoit. Podobnie jak merrillit są to fosforany.

Nodule reprezentują chalkofilne środowisko geochemiczne, w którym pierwiastki mają większe powinowactwo do siarki niż do tlenu. Metaliczna część meteorytu Morasko reprezentuje środowisko syderofilne, w którym pierwiastki charakteryzują się mniejszym od żelaza powinowactwem do siarki i tlenu. Oba te środowiska geochemiczne występują w meteorycie Morasko.

Magnetyczne właściwości meteorytu Morasko są charakterystyczne dla materiałów miękkich magnetycznie (słabe pole koercji, wysokie namagnesowanie nasycenia). Wynika to z dominacji fazy γ -FeNi (kamacyt), a bardzo niska koncentracja fazy $L1_0$ -FeNi marginalnie wpływa na magnetyzm meteorytu.

Tempo stygnięcia meteorytu Morasko, będącego częścią nieistniejącej planetoidy, nie było szybsze niż kilka stopni na milion lat. Potwierdza to obecność tetrataenitu, który nie tworzy się w przypadku szybszego schładzania płynnego stopu żelazo-niklowego.

Podziękowania

Bardzo serdecznie dziękujemy prof. Łukaszowi Karwowskiemu z Uniwersytetu Śląskiego za pomoc w analizie składu chemicznego krzemianów oraz identyfikację fazy merrillitowej w meteorycie Morasko.

Jesteśmy także bardzo wdzięczni dr Danucie Michalskiej-Nawrockiej z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu za pomoc w badaniach z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego.

Streszczenie

W Wielkopolsce, niedaleko Poznania, w miejscowości Morasko miał miejsce największy ze znanych dotychczas w Europie Środkowej spadek meteorytów żelaznych. Badania mineralogiczne tej pozaziemskiej materii ciągle dostarczają nowych informacji. W ostatnich latach odkryto w meteorycie Morasko dwa nowe minerały – moraskoit $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)\text{F}$ i czochralskiit $\text{Na}_4\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)_4$. Są to fosforany, które wykryły się w owalnych inkluzjach (nodulach), występujących w meteorytach żelaznych.

W artykule przedstawiono wyniki analizy składu chemicznego kilku nodulek, wyseparowanych ze znalezionych fragmentów meteorytu Morasko. Zidentyfikowano w nich krzemiany takie jak pirokseny z grupy klinoenstatytu oraz oliwiny z grupy forstertytu. Przy pomocy mikrosondy elektronowej zaobserwowano także obecność fosforanów w postaci merrillitów. W metalicznej części meteorytu pomiędzy taenitem i kamacytem zauważono lamele zbudowane z rzadko występującego w naturze tetrataenitu. Jest to faza twarda magnetycznie, która może stanowić tani zamiennik dla współcześnie używanych związków międzymetalicznych na bazie pierwiastków ziem rzadkich do wytwarzania magnesów trwałych.

Literatura

- Benedix G.K., McCoy T.J., Keil K., Love S.G., 2000, *A petrologic study of the IAB iron meteorites: Constraints on the formation of the IAB–winonaite parent body*, Meteoritics & Planetary Science 35, s. 1127–1141.
- Bogard D., Burnett D., Eberhardt P., Wasserburg G.J., 1968, *40Ar-40K ages of silicate inclusions in iron meteorites*, Earth Planet. Sci. Lett. 3, s. 275–283.
- Bordeaux N.C., 2015, *Structure-magnetism correlations and chemical order-disorder transformation in ferrous L1₀-structured compounds*, PhD thesis.
- Bottke W.F. Jr., Durda D.D., Nesvorný D., Jedickie R., Morbidelli A., Vokrouhlický D., Levison H.F., 2005, *Linking the collisional history of the main asteroid belt to its dynamical excitation and depletion*, Icarus 179, s. 63–94.
- Bronikowska M., Artemieva N.A., Wünnemann K., 2017, *Reconstruction of the Morasko meteoroid impact—Insight from numerical modeling*, Meteoritics & Planetary Science 52(8), s. 1704–1721.
- Bronikowska M., Artemieva N.A., Wünnemann K., Szczuciński W., 2015, *Determining the initial parameters of the Morasko meteoroid*, Conference Paper: https://www.researchgate.net/publication/281833342_DETERMINING_THE_INITIAL_PARAMETERS_OF_THE_MORASKO_METEOROID.
- Buchwald V.F., 1975, *Handbook of Iron Meteorites*, University of California Press.
- Classen J., 1978, *The meteorite craters of Morasko in Poland*, Meteoritic 13, s. 245–255.
- Dominik B., 1972, *Wstępne wyniki mineralogicznych badań meteorytu Morasko*, Sprawozdania z Posiedzeń Komisji Naukowych PAN Oddział Kraków, 16/1, s. 244–246.

- Dominik B., Manecki A., Pawłowski K., 1974, *Microscopic and X-ray investigations of 2H- and 3R- graphite from the Morasko iron meteorite*, Mineralogia Polonica 5, s. 79–88.
- Dominik B., 1974, *Mineralogical and chemical study of coarse octahedrite Morasko*, PhD thesis (dysertacja), Faculté de Géologie, Académie des Mines et Métallurgie, Cracovie, Pologne, 1974, s. 166.
- Dominik B., 1975, *Efekty deformacji minerałów w meteorycie Morasko*, Sprawozdania z Posiedzeń Komisji Naukowych PAN Oddział Kraków, 18/2, s. 542–543.
- Dominik B., 1976, *Mineralogical and chemical study of coarse octahedrite Morasko (Poland)*, Prace Mineralogiczne 47, Komisja Nauk Mineralogicznych PAN, Zakład Narodowy Imienia Ossolińskich, Wyd. Polskiej Akademii Nauk, Wrocław, s. 7–53.
- Dominik B., 1977, *Shock and thermal transformations in meteorites from the Morasko crater field*, Meteoritics 12, s. 207–208.
- Hurnik H., 1976, *Meteorite Morasko and the region of the fall of the meteorite*. W: Meteorite „Morasko” and the region of its fall. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Idzikowski B., Kovac J., Diko P., Stankowski W.T.J., Muszyński A., 2010, *Crystalline Structure, Stoichiometry and Magnetic Properties of the Morasko Meteorite*, Acta Physica Polonica A, 118, s. 1071–1073.
- Karwowski Ł., Pilski A.S., Muszyński A., Arnold S., Notkin G., Grudziel A., 2011, *New Finds in the Morasko Meteorite Preserve, Poland*, Meteorites, 1(1), s. 21–28.
- Karwowski, Ł., Kusz, J., Muszyński, A., Kryza, R., Sitarz, M., Galuskin, E.V., 2015, *Moraskoite, Na₂Mg(PO₄)F, a new mineral from the Morasko IAB-MG iron meteorite (Poland)*, Mineralogical Magazine, 79, s. 387–398.
- Karwowski Ł., Kryza R., Muszyński A., Kusz J., Helios K., Drożdżewski P., Gałuskin E.V., 2016, *Czochnralskiite, Na₄Ca₃Mg(PO₄)₄, a second new mineral from the Morasko IABMG iron meteorite (Poland)*, European Journal of Mineralogy, 28(5), s. 969–977.
- Kleine T., Mezger K., Palme H., Scherer E., Münker C., 2005, *Early core formation in asteroids and late accretion of chondrite parent bodies: Evidence from 182Hf-182W in CAIs, metal-rich chondrites, and iron Meteorites*, Geochimica et Cosmochimica Acta 69, s. 5805–5818.
- Luecke W., Muszyński A., Berner Z.A., 2006, *Trace element partitioning in the Morasko Meteorite from Poznan, Poland*, Geochemistry 66(4), s. 315–318.
- Muszyński A., Kryza R., Karwowski Ł., Pilski A.S., Muszyńska J., 2012, *Morasko. The largest iron meteorite shower in Central Europe*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Pilski A.S., Walton W., 1999: *Morasko – the largest European iron meteorite shower*, Meteoritel, 5(4), 1999, s. 27–28.
- Pilski A.S., Wasson J.T., Muszyński A., Kryza R., Karwowski Ł., Nowak M., 2013, *Low-Ir IAB irons from Morasko and other locations in central Europe: One fall, possibly distinct from IAB-MG*, Meteoritics & Planetary Science, 48(12), s. 2531–2541.
- Pokrzywicki J., 1955, *O niektórych mało znanych polskich meteorytach*, Studia Geologica Polonica V, PAN Zakład Nauk Geologicznych, Wydawnictwa Geologiczne, s. 433–437.
- Pokrzywicki J., 1964, *I. Meteoryty Polski. II. Katalog meteorytów w zbiorach polskich*. Studia Geologica Polonica XV, PAN Zakład Nauk Geologicznych, Wydawnictwa Geologiczne, s. 49–68.
- Stankowski W., Muszyński A., Klimm K., Schliestedt M., 2002, *Mineralogy of Morasko Meteorite and the structure of the craters*, Proc. Estonian Acad. Sci. Geol., 51 s. 227–240.
- Stankowski W., Muszyński A., 2008, *Time of fall and some properties of the Morasko meteorite*. Material Science – Poland, 26(4), s. 897–902.
- Szokaluk M., Jagodziński R., Muszyński A., Szczuciński W., 2015, *Ejecta blanket from the Morasko meteorite impact – first results, Bridging the Gap III: Impact Cratering in Nature*,

- Experiments, and Modeling*, University of Freiburg, Germany. LPI Contribution 1861, s. 1100.
- Walesiak T., 2017, *Kratery Morasko w świetle wiedzy na temat ukośnych impaktów*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 8, s. 149–167.
- Wasson J.T., Kallemeyn G.W., 2002, *The IAB ironmeteorite complex: A group, five subgroups, numerous grouplets, closely related, mainly formed by crystal segregation in rapidly cooling melts*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 66, s. 2445–2473.