

OLSZTYŃSKIE PLANETARIUM I OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE
POLSKIE TOWARZYSTWO METEORYTOWE
II SEMINARIUM METEORYTOWE
24-26.04.2003 OLSZTYN

Łukasz KARWOWSKI¹, Stanisław JACHYMEK², Anna LUDWIG³,
Agnieszka GURDZIEL⁴

**SKORUPA WIETRZENIOWA I OBTAPIENIOWA METEORYTÓW W
WARUNKACH KLIMATU UMIARKOWANEGO NA PRZYKŁADZIE
ZAKŁODZIA I MORASKA-PRZEŁAZÓW**

WSTĘP

Odnajdywane meteoryty świeżo po upadku mają ładnie wykształconą skorupę obtapieniową i dobrze zachowaną strefę oddziaływań termicznych. Swoisty problem stanowią meteoryty występujące w warunkach klimatu umiarkowanego, które przeleżały w glebie okres rzędu setek czy tysięcy lat. Procesy wietrzenia przebiegają tu zupełnie inaczej niż w przypadku meteorytów arktycznych i z terenów pustynnych. Znane dwa polskie meteoryty Zakłodzie i Morasko-Przełazy są przykładem okazów, które przebywały w glebie dłuższy czas i pokryły się dosyć grubą żelazistą skorupą. Powstaje pytanie, co dzieje się z tymi meteorytami, jakie procesy i jak szybko w nich zachodzą?

STREFY OBTAPIANIA METEORYTÓW

W trakcie przelotu przez atmosferę meteoryty ulegają obtapieniu. Zewnętrzna strefa obtapienia (skorupa obtapieniowa) nie przekracza na ogół 1-2 mm grubości. Wewnątrz meteorytu zmiany zachodzą na niewielkiej przestrzeni powodując nadtopienie łatwo topliwych minerałów oraz wyraźne spękanie ziaren – powstanie tzw. czarnych żyłek wypełnionych drobnodispersyjnymi siarczkami i fazą metalu (Judin et al., 1987).

Prezentowane meteoryty Zakłodzie oraz Morasko leżały długi czas w ziemi pokrywając się skorupą wietrzeniową złożoną głównie z materiału klastycznego otaczającego meteoryt, spojonego wtórnymi minerałami żelaza. Wydawać by się mogło, że skorupa obtapieniowa uległa całkowitemu zwietrzeniu. W obydwu przypadkach skorupa wietrzeniowa ma znaczną grubość rzędu 1 cm i czasem więcej.

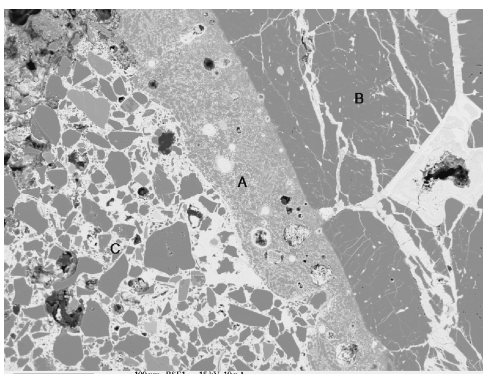
Badając mikroskopowo próby pochodzące z Zakłodzia posiadające warstwę zwietrzliny stwierdzono, ponad wszelką wątpliwość, obecność skorupy obtapieniowej wykształconej podobnie jak w meteorytach zebranych zaraz po upadku. Na fot. 1 przedstawiono strefę zwietrzliny (skorupę wietrzeniową C) oddzieloną od

^{1,4} Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec,
e-mail: 1 - lkarwows@wnoz.us.edu.pl, 4 – v.agnieszka@interia.pl

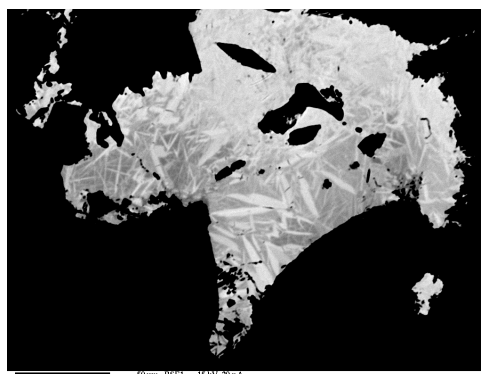
² Guciów 19, 22-470 Zwierzyniec, e-mail: guciow@guciov.pl

³ Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego, Uniwersytet Śląski, ul. Uniwersytecka 4,
40-007 Katowice, e-mail: lanna@interia.pl

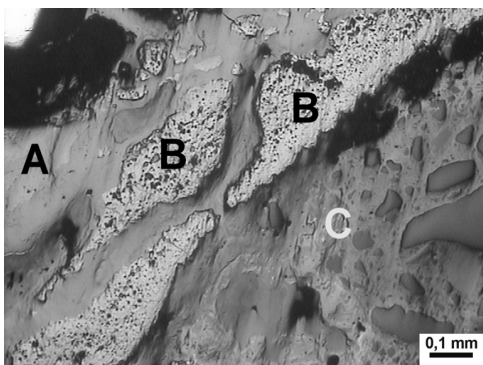
skorupy obtopieniowej (A), która przechodzi stopniowo w strefę wewnętrzną (B) tzw. strefę czarnych żyłek. Ta ostatnia jest także strefą oddziaływania wysokich temperatur. Strefa zewnętrzna jest w znacznej mierze zeszkliwiona. W jej obrębie występują liczne pęcherzyki oraz ziarna magnetytu i wüstytu. W strefie czarnych żyłek większość krzemianów jest spękana i pocięta żyłkami wypełnionymi minerałami rudnymi. W obrębie tej strefy blisko strefy zewnętrznej dochodzi także do wielu zmian w obrębie minerałów siarczkowych. Faza troilitowa ulega częściowemu rozkładowi. Wydziela się z niej łatwo lotna siarka a pozostają w obrębie troilitu drobne wrostki żelaza nisko-niklowego. Podobne zjawisko obserwowano w przypadku keilitu. W tej strefie kamacyt silnie ogrzany, a następnie szybko ochłodzony wydziela w swym obrębie martenzyt nisko-niklowy (fot. 2).



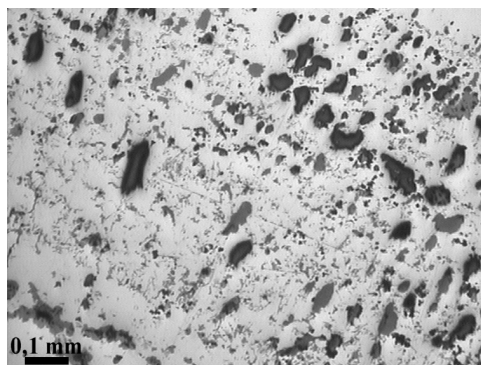
Fot. 1. Strefa termicznego oddziaływania w meteorycie Zakłodzie: (A) zewnętrzna strefa obtopieniowa, (B) strefa czarnych żyłek, (C) skorupa wietrzeniowa. Fotografia (BSE) wykonana na mikroskopie elektronowym CAMECA SX 100.



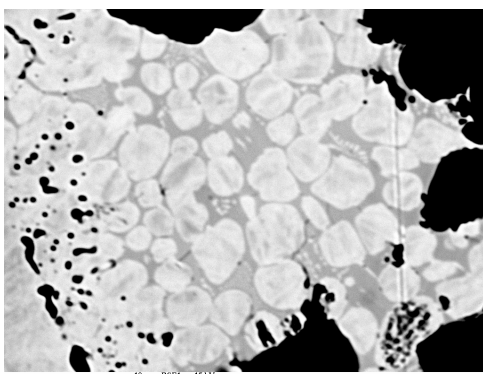
Fot. 2. W strefie podgrzanej na skutek gwałtownego chłodzenia wydzieliły się nisko-niklowe fazy martenzytowe o wrzecionowatych kształtach. Fotografia (BSE) wykonana na mikroskopie elektronowym CAMECA SX 100.



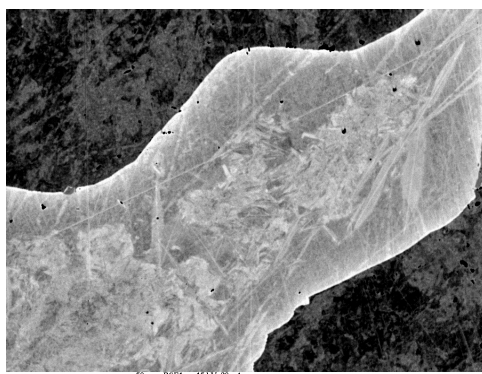
Fot. 3. Fragmenty strefy obtopieniowej meteorytu Morasko: (A) zwięzła partia meteorytu, (B) fragmenty skorupy obtopieniowej, (C) skorupa wietrzeniowa. Światło odbite, Inikol.



Fot. 4. Strefa zmian uderzeniowych w meteorycie Morasko (światło odbite, 1 nikol). Okaz Krzysztofa Sochy.

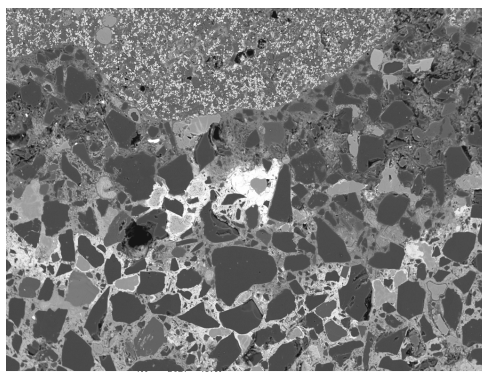


Fot. 5. Zmiany w obrębie ziarna schreibersytu w pobliżu strefy uderzeniowej z wydzieleniami wysoko-niklowego taenitu. Fotografia (BSE) wykonana na mikroskopie elektronowym CAMECA SX 100.



Fot. 6. Wydzielenia wysoko-niklowego martenzytu w taenicie ze strefy oddziaływania termicznego w meteorycie Moraska. Fotografia (BSE) wykonana na mikroskopie elektronowym CAMECA SX 100.

W meteorytach z Moraska i Przełazów także bardzo często zachowały się ślady po strefie topienia (Fot. 3). Wyznacza je głównie wąska strefa złożona z magnetytu. Ciekawostką są zmiany przedstawione na fot. 4. Okazy wcześniej zostały oczyszczone ze skorupy wietrzeniowej. Prezentowany na fotografii fragment jest najprawdopodobniej efektem impaktu. W jej obrębie zanikają fazy taenitu, schreibersytu i cohenitu. Pojawia się wiele ciemnych przestrzeni wypełnionych magnetytem, akaganeitem (chlorowym), wústytem i bliżej nieokreślonym minerałem o składzie Fe, Cl, O. Najbardziej zastanawiająca jest obecność znacznych ilości chloru.



Fot. 7. Wydzielenia wtórnych siarczków Ni, Co i Fe (białe) w strefie cementacji w obrębie skorupy wietrzeniowej i w pobliżu strefy obtopieniowej; Zakłodzie. Fotografia (BSE) wykonana na mikroskopie elektronowym CAMECA SX 100.

Poniżej tej strefy obserwuje się niekiedy silną mylonityzację ziaren schreibersytu, cohenitu i kamacytu. W obrębie ziaren schreibersytu zachodzą zmiany powodujące wydzielanie się kulistego taenitu (fot. 5). W taenicie ze stref przegrzanych obserwowano także wydzielenia wysoko-niklowego martenzytu (fot. 6).

SKORUPY WIETRZENIOWE

Skład mineralny skorup wietrzeniowych tak Zakłodzia, jak i Moraska jest podobny. Poza materiałem klastycznym (kwarc, skalenie, cyrkon, apatyt, granaty itp.) zawierają one znaczne ilości wodorotlenków żelaza reprezentowanych przez goethyt, lapidokrokit bądź akaganeit (patrz Tab.1). Skorupa wietrzeniowa Moraska zawiera także nieznaczną domieszkę minerałów ilastych. Badania rentgenowskie

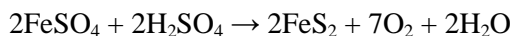
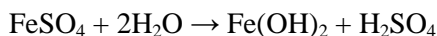
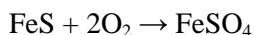
nie ujawniają innych faz mineralnych. Badania chemiczne wskazują na domieszki niklu i ślady kobaltu (Tab. 1). Badania mikroskopowe oraz w mikroobszarze pozwoliły na stwierdzenie obecności wtórnych siarczków w niewielkiej odległości od zewnętrznej skorupy obtopieniowej (Fot. 7). Mamy zatem do czynienia ze swoistą strefą cementacji, w której dochodzi do powstania wtórnych siarczków zasobnych w Ni i Co (Ni: 44,3 – 17,3% wag., Co: 10,1 – 3,2% wag.). Procesy te można w pewnym uproszczeniu przedstawić następująco:

Skład wyjściowy:

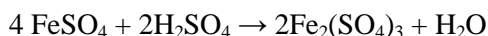
Skorupa obtopieniowa: magnetyt, Fe₃O₄; wüstyt, FeO; strefa zewnętrzna meteorytu: kamacyt, (Fe, Ni, Co); troilit, FeS; keilit, (Fe, Mg, Mn)S; oldhamit, CaS; schreibersit, (Fe, Ni, Co)P oraz krzemiany nie ulegające wtórnym przemianom.

Czynniki zewnętrzne: wolny tlen, woda, CO₂.

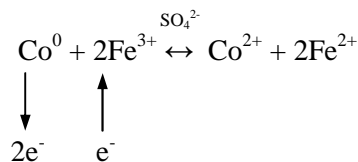
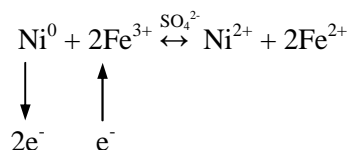
Faza monosiarczku żelaza (troilit, pirotyt) w wyniku reakcji z tlenem przechodzi w następujący sposób w dwusiarczek żelaza (piryt) z wydzielaniem kwasu siarkowego.



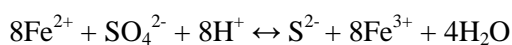
Kwas siarkowy reaguje z wydzielonym wcześniej siarczanem żelaza (II). W efekcie powstaje siarczan żelaza (III).



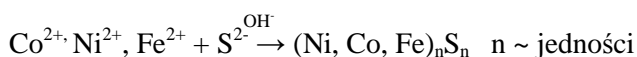
W środowisku kwaśnym nikiel i kobalt pod wpływem jonów Fe³⁺ przechodzą w stan jonowy i są zdolne do migracji.



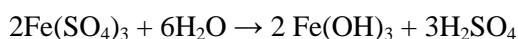
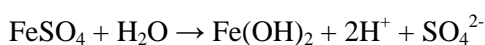
Jony Fe²⁺ reagując z jonami siarczanowymi powodują reakcję redukcji siarki do S²⁻.



Przy granicy strefy obtopieniowej, przy zmianie środowiska na zasadowe (możliwy wpływ węglanów obecnych w lessie) następuje wytrącanie wtórnych siarczków niklu, kobaltu i żelaza zbliżonych do pentlandytu kobaltowego.



Siarczany żelaza (II i III) w środowisku wodnym ulegają hydrolyzowi z wydzielaniem odpowiednich wodorotlenków.



Wodorotlenek Fe^{2+} jest związkiem nietrwałym w warunkach powierzchniowych i ulega utlenieniu do wodorotlenku Fe^{3+} . W końcowym efekcie powstaje mieszanina goethytu, lapidokrokitu i akaganeitu.

Siarczki powstałe w bardzo wąskiej strefie cementacji, ulegają w miarę upływu czasu utlenieniu, przechodząc w wodorotlenki żelaza i dając w efekcie bardzo zwięzłą skorupę wietrzeniową. W trakcie tych procesów podkoncentrowane pierwiastki (Ni i Co) zostają rozproszone w otaczającym środowisku. Pozostaje jedynie goethyt i akaganeit z niewielką domieszką niklu.

W przypadku okazu meteorytu Morasko znalezionej na głębokości około 1m przez K. Sochę stwierdzono, że w odległości kilku cm od skorupy pierwiastki Ni i Co ulegają rozcieńczeniu, a ich zawartość spada do 0.29% wag. w przypadku Ni oraz 0.03 % wag. w przypadku Co. Meteoryty żelazne ulegają procesom podobnym do korozji przedmiotów żelaznych powoli przechodząc w wodorotlenki żelaza. Skorupa wietrzeniowa wraz z skorupą obtopieniową stanowią doskonały ekran chroniący przed rozwojem dalszej korozji.

Procesy wietrzeniowe rozprzestrzeniają się w obrębie meteorytów zgodnie z ułożeniem spękań i mikrospełkań.

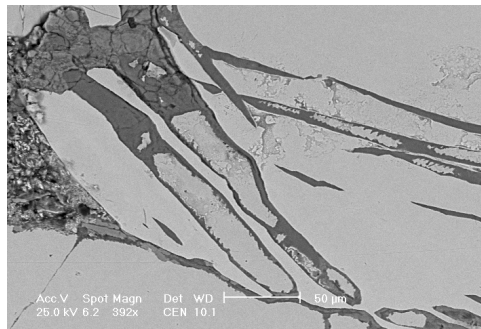
W meteorycie Zakłodzie procesy te sięgają bardzo głęboko objawiając się wyraźnie zażelazieniem pierwotnie jasnego meteorytu. Sprzyja temu niewątpliwie łatwo rozpuszczalny siarczek oldchamitu (CaS) dostarczający, jako pierwszy, pod wpływem migrującej wilgoci i tlenu - porcji kwasu siarkowego. W obrębie meteorytu, głównie przy brzegach, następuje w pierwszym rzędzie przejście troilitu (FeS) w dwusiarczek żelaza (FeS_2). Kolejnym procesem jest zastępowanie dwusiarczku żelaza wodorotlenkami Fe. Faza keilitu ulega także przejściu w wodorotlenki Fe. Fazy metaliczne zostają w pierwszym stadium rozkładu otoczone warstwą wtórnego siarczku (FeS_2 lub pentlandytu), a następnie ulegają przemianom w wodorotlenki żelaza.

W meteorycie Morasko w wielu miejscach nie obserwuje się wyraźnych zmian. W miejscach spękań i uszkodzeń skorupy obtopieniowej procesy wietrzenia prowadzą do zastępowania taenitu i kamacytu przez wodorotlenki Fe. Drobne rhabdy-

ty pozostają niezmienione tkwiąc w masie wodorotlenków. W niektórych rejonach szybciej ulegają wietrzeniu lamelki taenitowe (fot. 8), w innych taenit jest bardziej odporny od kamacytu (fot. 9).



Fot. 8. Lamelka taenitowa zastępowana, w odróżnieniu od kamacytu, wodorotlenkami żelaza na brzegu meteorytu Morasko (światło odbite, 1 nikol).



Fot. 9. Zastępowanie kamacytu wodorotlenkami żelaza. Lamelki taenitu nie ulegają wtórnym zmianom. Fotografia (BSE) wykonana na mikroskopie elektronowym CAMECA SX 100.

Poddano także badaniom produkty wietrzenia meteorytu Morasko, który przebywał w warunkach pokojowych ok. 7 lat ulegając praktycznie całkowitemu zwiędzeniu, dawał się pokruszyć w rękach itd. (Tab. 1).

WNIOSKI

1. Skorupa wietrzeniowa wraz ze skorupą obtopieniową stanowią doskonały ekran powstrzymujący szybkie wietrzenie meteorytów w klimacie umiarkowanym pod warunkiem, że meteoryty przykryte są warstwą ziemi.
2. Szczególnie chronione są meteoryty żelazne znajdujące się pod powierzchnią ziemi.
3. Meteoryty kamienne wietrzeją szybciej, chociaż w okresie około 200 lat proces ten nie powoduje istotnych zmian.
4. Meteoryty żelazne jak i kamienne zawierające kamacyt oraz siarczki działają redukcyjnie. Zapoczątkowany proces wietrzenia jest powstrzymywany przez powstającą na granicy skorupy obtopieniowej strefę cementacji wtórnych siarczków wzbogaconych w nikiel i kobalt. Przy meteorytach żelaznych strefa cementacji powstaje jedynie przy odsłoniętych na powierzchni meteorytu skupieniach troilitowych.
5. Meteoryty żelazne są chronione przed dalszą degradacją zwięzłą skorupą wietrzeniową złożoną z wodorotlenków żelaza.
6. Meteoryty żelazne pozbawione ochronnej skorupy wietrzeniowej ulegają bardzo szybkiemu wietrzeniu w warunkach temperatury i wilgotności pokojowej. Rozpoczęty proces może doprowadzić do całkowitego rozkładu meteorytu w ciągu kilku lat jeżeli nie zostanie on odpowiednio zabezpieczony.
7. Niewątpliwie, jednym z najważniejszych czynników powstrzymujących

wietrzenie meteorytów pogrzebanych w warunkach naszego klimatu jest duża stabilność temperatury i wilgotności otoczenia.

METEORYT	SKŁAD FAZOWY	SKŁAD CHEMICZNY FAZ ROZPUSZCZALNYCH W KWASACH (% WAG.)
Morasko-Przełazy – skorupa wietrzeniowa	kwarc, skalenie, cyrkon, granat, goethyt, lepidokrokit, akaganeit, magnetyt, trevoryt	Fe: 4 - 50% Ni: 0,23 – 4,25% Co: 0,13 – 0,21%
Morasko-Przełazy – siedmioletnia zwietrzelina w warunkach pokojowych	goethyt, akaganeit, ślady kamacytu i schreibersytu	Fe – 49,7% Ni – 5,08% Co – 0,26%
Zakłodzie – skorupa wietrzeniowa	kwarc, skalenie, cyrkon, goethyt, ankeryt	Fe: 15,7 - 16,9% Ni: 0,12 - 0,53% Co: 0,02 - 0,03% Mn: 0,09 - 0,13%
Zakłodzie – strefa cementacji	siarczki niklu, kobaltu i żelaza.	Fe: 39,6 – 12,2%, Ni: 44,3 – 17,3%, Co: 10,1 – 3,2%, S: 39,6 – 32,6%.

Tabela 1. Skład fazowy i chemiczny produktów wietrzenia meteorytów Moraska i Zakłodzia.

Podziękowania: Autorzy serdecznie dziękują Panu Krzysztofowi Sosze za udostępnienie licznych meteorytów z Moraska do badań jak i zwietrzeliny meteorytowej.

LITERATURA

YUDIN I. A., KOLOMENSKY V. D., 1987: Mineralogia meteoritov. A. N. Sverdlovsk.