

Agata KRZESIŃSKA¹

Charakterystyka petrologiczna i chemiczna meteorytu Antonin – klasyfikacja oraz zarys historii termicznej i uderzeniowej

Petrology and chemistry of the Antonin meteorite – classification and reconstruction of thermal-collisional history

Abstract: Meteorite Antonin fell on 15th July 2021 in Poland. The bolide was observed and recorded by cameras of European Bolide Network, Astronomical Institute of Czech Academy of Sciences. Soon after the fall, specimen of meteorite was recovered and delivered for classification. In this paper, analytical results collected in order to classify the Antonin meteorite are reported.

Antonin is L5 ordinary chondrite with deformation degree S3 or S4. This paper includes reports of heterogeneous texture of chondrite and reports on chemical composition of minerals: olivine, low-Ca pyroxene, diopside and glasses, phosphates, chromite and ilmenite, as well as sulfides and native FeNi alloy. The minerals reveal different equilibration degree.

Analysis of the texture and chemical composition of Antonin allows to put the meteorite in the framework of current classification of meteorites. It also facilitates making hypotheses on the thermal and collisional processes, that the meteorite experienced while on its parent body.

Keywords: Antonin, L5 chondrite

1. Wstęp – spadek meteorytu Antonin

O poranku 15 lipca 2021 r. kamery Europejskiej Sieci Bolidowej, obsługiwanej przez Instytut Astronomiczny Akademii Nauk Republiki Czeskiej (Astronomický ústav AV ČR Ondřejov) zarejestrowały przelot bolidu nad południowo-zachodnią Polską. Z zapisu wyznaczono parametry przelotu bolidu, takie jak prędkość przed zderzeniem z ziemską atmosferą, kąt wejścia w atmosferę, czy pierwotną masę meteoroidu. Obliczony został także prawdopodobny obszar spadku i rozrzutu meteorytów (Shrbený i in., 2022).

Dane o prawdopodobnym obszarze spadku zostały opublikowane na stronach IA CAS. Przewidziano, że do Ziemi mogło dotrzeć maksymalnie 10 kg materii meteorytowej, która spadła w okolicach miasteczek Mikstat i Antonin w województwie wielkopolskim (Shrbený i in. 2022). Natychmiast podjęte zostały próby

¹ Centre for Earth Evolution and Dynamics, Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norway; email: ag.krzesinska@gmail.com

przeszukania wskazanego terenu. Dnia 2 sierpnia udało się odnaleźć jeden okaz o wadze 350 g. Fragment został znaleziony w obrębie pola spadku, dokładnie w miejscu, gdzie przewidywano taką masę jak ma odnaleziony fragment. Pokazuje to, że założenia dotyczące fragmentacji meteoroidu są poprawne, stąd też przewidywania co do pozostałych fragmentów potencjalnie znajdujących się w obszarze spadku, prawdopodobnie są także realne. Zatem, należy oczekiwać, że w obszarze tym pozostaje jeszcze kilka podobnej wielkości fragmentów. Niestety, do dziś nie został odnaleziony żaden z pozostałych okaz.

Fragment meteorytu znaleziony został przez p. Kryspina Kmiecika, a współtowarzyszami wyprawy byli p. Andrzej Owczarzak, p. Michał Nebelski oraz p. Jędrzej Kmiecik. Poszukiwacze opublikowali raporty z wyprawy poszukiwawczej, które można znaleźć na stronach internetowych (cosmoartel.pl, woreczko.pl) oraz w periodyku *Meteoryt* (Owczarzak 2021; Morys i Żmija 2021). Znaleziony okaz jest niemal w całości pokryty skorupą obtopieniową, a jego miejscami odsłonięta struktura wewnętrzna nie pozostawiała wątpliwości, że jest to chondryt zwyczajny.

Meteoryt znaleziony był podczas wyprawy prywatnej, stąd też udokumentowanie połączenia znaleziska z bolidem wymagało zebrania naukowych dowodów takich jak np. czas spadku. Znaleziony okaz bardzo szybko trafił do Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Otwocku-Świerku, gdzie metodami nieniszczącymi zmierzone zostały aktywności radionuklidów α -promieniotwórczych w kompletnym okazie meteorytu. Obecność ^{48}V , ^{51}Cr oraz ^7Be , których czas połowicznego rozpadu wynosi odpowiednio 16, 28 i 53 dni, jednoznacznie potwierdziła, że znaleziony fragment jest świeżym spadkiem, który można czasowo łączyć z obserwacją bolidu. Wyniki tych analiz opublikowane zostały w zbiorczym artykule naukowym dotyczącym bolidu i meteorytu Antonin (Shrbený i in. 2022) oraz są dostępne w pracy Tymieńskiego i in. (2023).

Z fragmentu meteorytu odcięty został materiał potrzebny do klasyfikacji i rejestracji. Depozyt naukowy w postaci dwóch płytek o masie 20,8 g został umieszczony w Muzeum Ziemi Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Masa główna znalezionego meteorytu pozostaje własnością znalazcy. Z fragmentu wykonano także płytkę cienką do badań i klasyfikacji.

Meteoryt został oficjalnie zarejestrowany pod nazwą Antonin i zaakceptowany przez Meteoritical Society w maju 2022. Klasyfikacja opublikowana jest w *Bulletynie Meteorytowym* numer 111.² Charakterystyka petrograficzna i mineralogiczna meteorytu wykonana w celach klasyfikacji została ponadto przedstawiona w publikacji łączącej meteoryt z obserwacją bolidu (Shrbený i in. 2022). Poniżej opisana jest struktura i charakterystyka petrograficzna meteorytu oraz załączone są wyniki analiz składu chemicznego wszystkich minerałów Antonina, które wykonane były w celu klasyfikacji.

² <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=77489>

2. Metodologia i protokół klasyfikacyjny

Fragment przeznaczony do klasyfikacji przekazany był w postaci cienkiego plastra, z którego wykonana została płytka cienka. Płytka poddana była obserwacji mikroskopowej w świetle przechodzącym i odbitym oraz bardziej szczegółowym obserwacjom SEM i analizie EPMA. Analizy SEM i EPMA wykonane zostały na Wydziale Nauk o Ziemi (Department of Geosciences) Uniwersytetu w Oslo. Obrazy SEM i analizy EDX zebrane były przy użyciu mikroskopu elektronowego Hitachi SU5000 FEG-SEM wyposażonego w detektor EDX Dual Bruker Quanta Xflash30, z użyciem wiązki elektronowej o napięciu przyspieszającym 15 kV. Analiza składu chemicznego minerałów w mikroobszarze EMPA wykonana była przy użyciu instrumentu Cameca SX-100. Warunki analityczne to 15 kV napięcia przyspieszającego i 20 nA natężenia wiązki. Analizy wykonane były przy skupionej wiązce o średnicy 1 μ m średnicy. Do analizy pierwiastków głównych oraz wybranych pierwiastków pobocznych zastosowano czas zliczania pików 10–20 s. Do analizy Co i Cu w stopach żelazo-niklu wydłużono czas zliczania do 40 s. Analizy poddane były standaryzacji przy użyciu standardów naturalnych i syntetycznych typowych dla pracy z urządzeniem Cameca SX-100. Zastosowano także korektę PAP oraz dodatkową korektę w celu wyeliminowania nakładania się pików Fe-K na Co-K w fazach żelazo-niklowych. Fosforany analizowane były dwustopniowo: Na, Cl i F przy użyciu wiązki 10 kV i 8 nA, a P, Mg, Ca, K, Fe i Mn przy użyciu wiązki 15 kV i 15 nA, po czym wyniki analiz zostały zintegrowane.

Już na podstawie charakterystyki skorupy obtopieniowej, a także struktury skały odsłoniętej w odprysnięciach skorupy, można wnioskować, że Antonin jest chondrytem zwyczajnym, prawdopodobnie zrównoważonym. Klasyfikacja takiego chondrytu wymaga określenia:

1. składu chemicznego minerałów meteorytu, ponieważ ten odzwierciedla naturę pierwotnego materiału, który został zagregowany na ciele macierzystym meteorytu,
2. stopnia zrównoważenia chemicznego materiału wynikającego – do pewnego stopnia – z zaawansowania procesów termicznych na ciele macierzystym,
3. zapisu deformacji uderzeniowej odzwierciedlającej historię kolizyjną macierzystego ciała meteorytu.

2.1. Przypisanie grupy chemicznej

Grupa chemiczna chondrytu (H, L czy LL) przyporządkowana została na podstawie analizy składu chemicznego oliwinu, niskowapniowego piroksenu i kamacytu. Jest to typowa metoda stosowana dla chondrytów zrównoważonych, możliwa do zastosowania dzięki temu że krzemiany – oliwin i niskowapniowy piroksen – budujące chondryty zwyczajne zawierają Fe i Mg, których zawartość staje się jednorodna wskutek procesu równoważenia termicznego. Każda grupa chondrytów zwyczajnych wykazuje więc specyficzny zakres zawartości Fe w oliwinie i piroksenie. Stopień utlenienia materiału odzwierciedlony jest natomiast w proporcji Fe zawartego w stopie rodzimym (Fe^0) i w krzemianach (Fe^{2+}). Ponieważ Co

podstawia Fe w strukturze metalu rodzimego FeNi, jego zawartość w kamacycie jest także charakterystyczną cechą diagnostyczną dla chemizmu pierwotnego materiału. Stąd też, określenie grupy chemicznej chondrytu wykonane było na podstawie porównania składu chemicznego jego minerałów głównych i odniesienia do skompilowanych danych literaturowych (Rubin 1990; Brearley i Jones 1998).

Grupa chemiczna meteorytu zweryfikowana została poprzez analizę chemizmu globalnego próbki. Poszczególne grupy chondrytów wyróżniają różne zawartości i proporcje pierwiastków trudnooplwliwych: Al i Ca do typowych pierwiastków mineralotwórczych takich jak Mg, Fe czy Si. Proporcje pomiędzy pierwiastkami odzwierciedlają procesy zachodzące w dysku protoplanetarnym i temperatury tworzenia materiału oraz częściowo rejon dysku, w którym powstawało ciało macierzyste danej grupy (Hutchison 2004 i literatura tam cytowana). Chemizm globalny Antonina ustalony został poprzez zespolenie modalnego składu mineralnego płytki cienkiej i analiz składu chemicznego minerałów w mikroobszarze.

2.2. Ustalenie typu petrograficznego

Procesy wtórne na ciele macierzystym przybliżone są poprzez klasyfikację petrologiczną, zbiorczo opisującą przeobrażenia termiczne na wczesnym etapie tworzenia się ciała macierzystego (np. Sears i Dodd 1988; Huss i in. 2006). Standardowo stosowanym schematem w tym celu jest 6 stopniowa klasyfikacja VanSchmussa i Wooda (1967). Schemat bierze pod uwagę stopień krystaliczności oraz rekrytalizacji materiału, zakładając, że wyższa krystaliczność i bardziej zaawansowana rekrytalizacja oznaczają większe zaawansowanie metamorfizmu i akcyjnych procesów termicznych. Parametrem diagnostycznym (w rzeczywistości bardziej opisowym niż ilościowym), jest stopień zrekrystalizowania chondr (i zatarcia ich granic z matriks) oraz krystaliczność i rozmiar ziarna plagioklastu. Dla chondrytów zwyczajnych (takich jak Antonin), typ petrograficzny 3 oznacza materiał pierwotny – minimalny wpływ procesów termicznych i metamorficznych, natomiast typy 4-6 to zapis wzrastającego stopnia metamorfizmu. Wzrost procesów termicznych manifestuje się obecnością plagioklastu w miejscu pierwotnego mezostazis oraz niemal całkowitym zanikiem chondr. Konsekwencją metamorfizmu jest też wspomniana wyżej jednorodność chemiczna krzemianów – oliwinu i piroksenu. Typ petrograficzny meteorytu Antonin został przypisany na podstawie wykonanych analiz chemicznych oraz porównania z danymi literaturowymi, zabranymi przez Rubin (1990).

2.3. Klasyfikacja szokowa

Dla opisu deformacji uderzeniowej chondrytu, zastosowano standardowy schemat zaproponowany przez Stöfflera i in. (1991). Schemat ten bierze pod uwagę deformację wewnątrzkrystaliczną oliwinu – obecność podziarn oraz planarnych spękań, które powstają w odpowiedzi materiału na deformację w wysokich ciśnieniach. Schemat bierze także pod uwagę izotropizację plagioklastu i wskaźniki lokalnego

nierównowagowego topienia takie jak żyły stopowe czy kieszenie stopowe. Indeks szokowy skały – od S1 do S6 – przypisany jest na podstawie statystycznej analizy pojedynczych ziaren oliwinu, które pomiędzy sobą mogą się różnić zaawansowaniem deformacji, ponieważ fala uderzeniowa przechodzi bardzo niejednorodnie przez skały i jej efekty kumulują się na granicach ziaren o silnym kontraście.

Do klasyfikacji Antonina zanalizowana została populacja >50 ziaren oliwinu o rozmiarach 50–100 μm , równomiernie rozłożonych w obrębie próbki i każdemu przypisany został indeks szokowy. Aby ziarno uznane było za S1, musiało wykazywać brak deformacji wewnątrzkrystalicznej manifestujący się ostrym wygaszaniem światła pod mikroskopem polaryzacyjnym. Ziarna o stopniu deformacji S2 wykazują faliste wygaszanie światła, sugerujące obecność podziarn. Ziarna S3 dodatkowo posiadają zespół spękań planarnych, zawierający przynajmniej trzy równoległe spękania, lub dwa odrębne systemy, każdy zawierający dwa spękania. Ziarna S4 charakteryzują się mozaikowym wygaszaniem światła, a pojedyncze podziarna mają zazwyczaj rozmiary mniejsze niż odstęp między równoległymi planarnymi spękaniem. Ziarna S5 (brak w badanej próbce Antonina) wykazują intensywną mozaikowość wygaszania światła, wiele planarnych spękań, a także obecność tzw. PDF – struktur planarnej amorfizacji. Ziarna S6 wykazywałyby skorodowane granice i ślady rekrytalizacji ze stopu uderzeniowego.

Po przypisaniu indeksu uderzeniowego każdemu analizowanemu ziarnu, stopień szokowy skały jako całości został wyznaczony na podstawie procedury zaproponowanej przez Jamsja i Ruzicka (2010) – stopień szokowy skały to najwyższy indeks wykazywany przez >25% populacji ziaren.

Standardowo, klasyfikacja meteorytów obejmuje także określenie stopnia zwietrzenia. W przypadku Antonina, który był świeżym meteorytem, podjętym szybko po spadku, stopień zwietrzenia to W0.

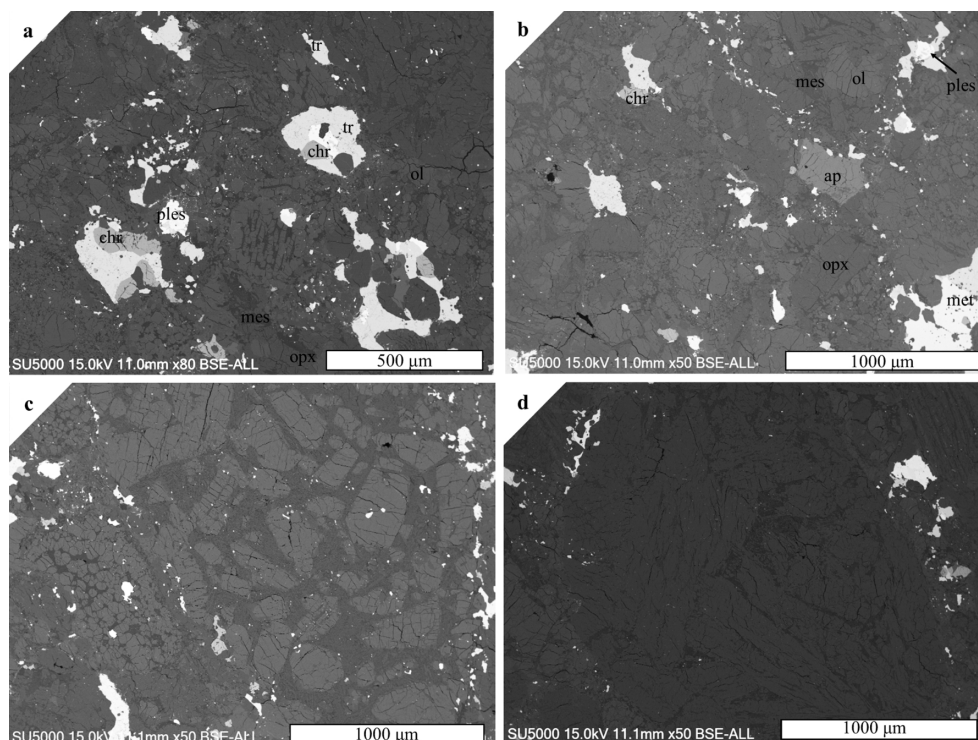
3. Wyniki – petrografia i struktura oraz skład mineralny i chemiczny

Zarówno na odsłoniętych powierzchniach wewnętrznych meteorytu w miejscach odprysnięcia skorupki obtopieniowej, jak i na przeciętych powierzchniach meteorytu ukazuje się wyraźnie chondrytowa struktura skały z wieloma zianami żelazoniklu oraz kilkoma zachowanymi chondrami. Struktura meteorytu jest pełnokrystaliczna, ze śladami dość zaawansowanej rekrytalizacji (ryc. 1), wskazując, że mamy do czynienia ze zrównoważonym chemicznie chondrytem zwyczajnym.

W obrazie mikroskopowym widoczne są liczne miejsca z zachowanym szklistym lub drobnokrystalicznym mezostasis. Natomiast rzadki jest krystaliczny plagioklaz i – jeśli obecny – ziarna mają rozmiar poniżej 50 μm (ryc. 1, ryc. 2).

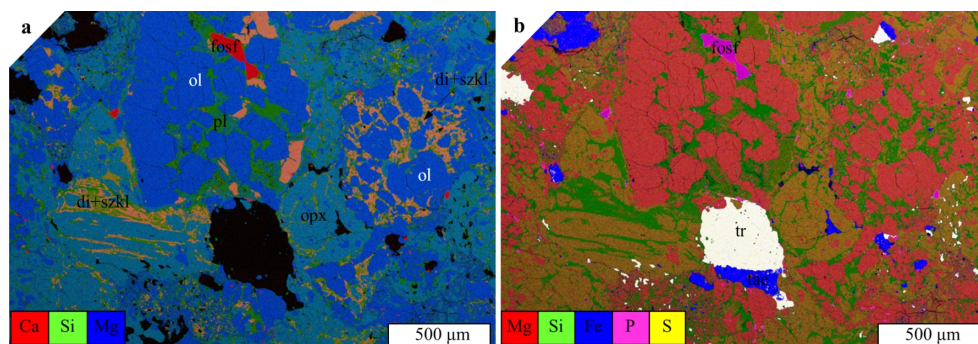
3.1. Skład chemiczny minerałów

Pomimo niskiego stopnia zrównoważenia teksturalnego chondrytu, chemicznie Antonin wykazuje niemal pełny stopień zrównoważenia. Pomierzony skład chemiczny oliwinu i niskowapniowego piroksenu wskazują na niewielkie odchy-



Ryc. 1. Obrazy BSE ukazujące skład mineralny i strukturę chondrytu Antonin. **a.** Zachowane chondry i szkliste mezostazis. **b.** Wśród minerałów obecne są niemal milimetrowej wielkości ziarna fosforanów. **c** i **d.** Chondry ze szklistym mezostazis przetrześniętym z mikrokryształami diopsydu. Ol – oliwin, opx – niskowapniowy piroksen, chr – chromit, tr – troilit, met – metal, ples – plessyt (metal), mes – szkliste mezostazis chondr, ap – apatyt.

Fig. 1. Mineral composition and structure of Antonin chondrite. **a.** Retained chondrules and glassy mesostasis. **b.** Mm-sized phosphates in the structure of meteorite. **c** and **d.** Chondrules with retained mesostasis and microcrystallites of diopside. Ol – olivine, opx – low-Ca pyroxene, chr – chromite, tr – troilite, met – metal, ples – plessite, mes – glassy mesostasis, ap – apatite.

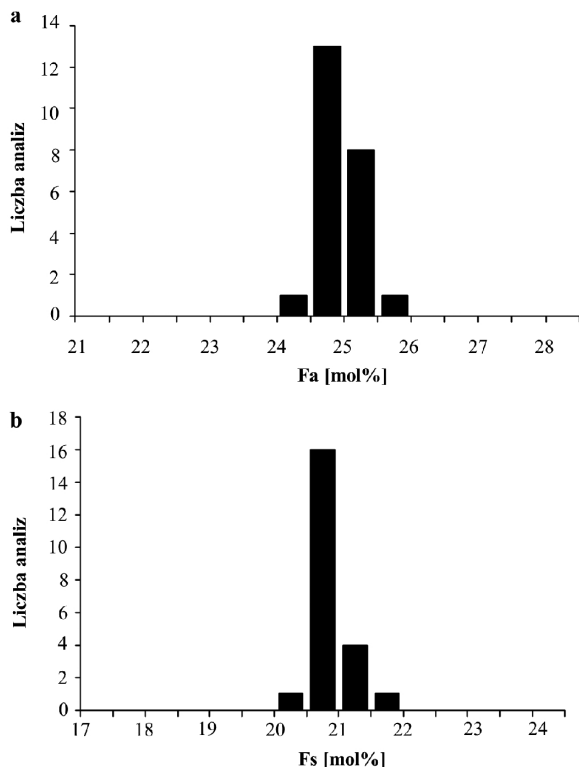


Ryc. 2. Struktura Antonina w obrazie elektronowym SEM/EDX. Nalożone na siebie mapy rozmieszczenia poszczególnych pierwiastków chemicznych. Widoczne są obszary szklawa skaleniowego oraz częściowo zrekrystalizowane mezostazis zawierające diopsyd i plagioklaz.

Fig. 2. Texture of Antonin seen in SEM/EDX imaging and composites of elemental maps. Glassy mesostasis and microcrystallites of diopside are seen.

lenia zawartości Fe and Mg zarówno wewnątrz ziarn (brak zonalności składu, ryc. 1 i 2) jak i pomiędzy poszczególnymi ziarnami.

Pomierzony skład 24 ziaren oliwiny wskazuje na zawartość Fa w zakresie 23,9–25,1 mol% i odchylenie standardowe 0,26 mol% Fa przy średniej 24,4 mol% Fa (ryc. 3a). Także zawartość pierwiastków pobocznych w oliwinie, np. Mn jest zrównoważona i wynosi 0,44–0,55 wt%. Podobnie do oliwiny, niskowapniowy piroksen jest chemicznie zrównoważony zarówno pod względem zawartości pierwiastków głównych jak i pobocznych. Zawartość Fs w piroksenie, pomierzona w 25 punktach analitycznych, jest w zakresie 20,4–21,9 mol%, przy średniej 20,9 mol% i odchyleniu standardowym 0,29 mol% (ryc. 3b). Zawartość Wo (cząsteczka Ca) mieści się w zakresie 0,7–2,0 mol%, przy średniej 1,18 mol% i odchyleniu standardowym 0,27 mol%. Zawartości MnO w piroksenie są w zakresie 0,45–0,57 wt%, Cr₂O₃ może występować w ilości do 0,33 wt% i Al₂O₃ jest na poziomie 0,04–0,51 wt%.



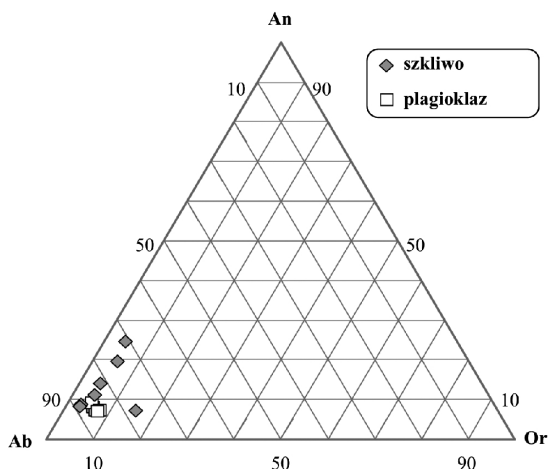
Ryc. 3. Histogramy składu krzemianów pomierzone za pomocą mikros sondy elektronicznej, EMPA. **a.** Zawartość cząsteczki fajalitowej w oliwinie. **b.** zawartość cząsteczki ferrosilitowej w niskowapniowym piroksenie. Dla porównania zawartość cząsteczki fajalitowej w oliwinie w meteorycie Pultusk dla typu H5 waha się w zakresie 3 mol%, a dla typów niższych, H4 wynosi ponad 5 mol% (Fig. 3 w pracy: Krzezińska 2016).

Fig. 3. Olivine and low-Ca pyroxene composition **a.** Histogram of Fa content in olivine grains. **b.** Histogram of Fs content in low-Ca pyroxene grains.

W przeciwieństwie do zrównoważonych minerałów krzemianowych, zachowane szkliwo skaleniowe (6 analiz) ma dość szeroki zakres składu (ryc. 4): 8,2–24,7 mol% An (średnia 14,4 i odchylenie standardowe 6,5 mol%) i 2,9–5,4 mol% Or (średnia 4,2 mol% i odchylenie standardowe 0,99 mol%). Szkliwo zawiera też FeO w ilości aż do 2,2 wt% i MgO w ilości do 0,74 wt%. Krystaliczny plagioklaz (7 analiz) ma skład bardziej zrównoważony niż szkliwo (ryc. 4), z zawartością An na poziomie 6,9–8,9 mol% (średnia 7,6 mol%, odchylenie standardowe 0,85 mol%) i Or 5,3–7,9 mol% (średnia 6,7 mol%, odchylenie standardowe 1,05 mol%). Zawartości FeO i MgO w plagioklazu są niższe niż w szkliwie, choć różnica ta jest nieznaczna (FeO: 0,46–0,74 wt% i MgO: 0,01–0,03 wt%). Porównanie składu szkliwa i plagioklazu wyraźnie pokazuje, że plagioklaz krystalizował z pierwotnego szkliwa, wykluczając ze swej sieci krystalicznej pierwiastki niedopasowane takie jak Fe i Mg.

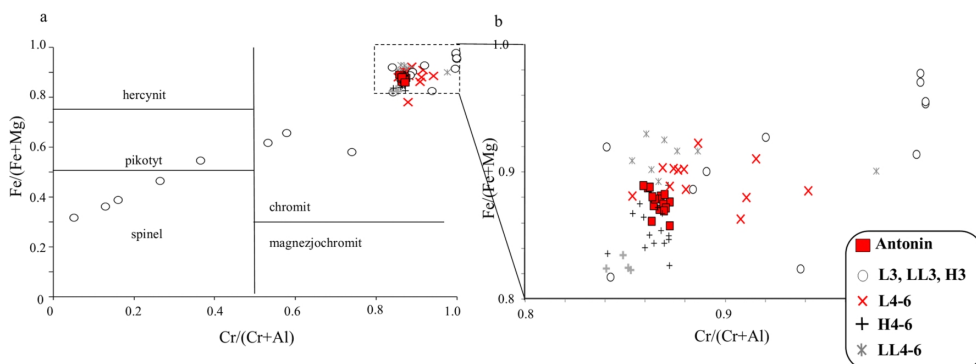
Wśród minerałów pobocznych chondrytu Antonin wymienić należy chromit, ilmenit i fosforany: Cl-apatyt i merrillit (ryc. 1, ryc. 2). Zarówno chromit jak i ilmenit są dobrze zrównoważone chemicznie i osiągają rozmiary 50–100 μm . Chromit zdominowany jest przez Fe i Cr (Fe# na poziomie 0,86–0,89 i Cr# w zakresie 0,81–87, ryc. 5). Dodatkowo zawiera śladowe ilości TiO_2 (1,3–2,5 wt%), MnO (0,6–0,8 wt%), V_2O_3 (0,6–0,8 wt%) i ZnO (0,2–0,4 wt%). W analizowanej płytce cienkiej znalezione były dwa ziarna ilmenitu, które są także głównie zbudowane z Fe. Zawartość geikielitu (Mg-ilmenit) to 10,4–13,3 mol% a zawartość pirofanitu (Mn-ilmenit) to 3,0–3,2 mol%.

Merrillit (fosforan) tworzy ziarna wielkości do 500 μm . Jego skład jest zdominowany przez CaO, jednak zawiera znaczące – i dość zrównoważone – zawartości Na_2O (2,5–2,9 wt%), MgO (3,4–3,7 wt%) i FeO (0,3–0,8 wt%) (ryc. 6a). Apatyt, stanowiący samodzielne jednorodne ziarna, często także wielkości aż do 500 μm zawiera 4,4–5,4 wt% Cl i zaledwie 0,4–0,8 wt% F. Jest to minerał



Ryc. 4. Skład szkliwa skaleniowego (zachowanego w mezostazis chondr) oraz krystalicznego plagioklazu pomierzony za pomocą mikros sondy elektronowej (EMPA).

Fig. 4. Composition of feldspathic glass and plagioclase crystals in Antonin.



Ryc. 5. Skład chromitu pomierzony za pomocą mikrosondy elektronowej (EMPA) i wyrażony w proporcji Cr do Al (główne kationy trójwartościowe w strukturze spinelu) oraz Fe do Mg (główne kationy dwuwartościowe). Dane literaturowe: Bunch i in. 1967; Kessel i in. 2007; Krześcińska 2016.

Fig. 5. Composition of chromite expressed in correlation of Cr# and Fe#. Literature data from: Bunch et al. 1967; Kessel et al. 2007; Krześcińska 2016.

bezwodny, typowo dla apatytów chondrytowych zdominowany przez Cl (ryc. 6b, por. Lewis i Jones 2016; Krześcińska 2017). Apatyt zawiera domieszki Fe, Na, niekiedy Mg, jednak ich zawartość jest mniej jednorodna niż w merrillicie (ryc. 6a). Zawartości FeO to 0,1–1,2 wt%, Na₂O to 0,3–0,5 wt% i MgO poniżej 0,04 wt%.

Typowo dla skały chondrytowej, Antonin zawiera też minerały metaliczne, głównie kamacyt i taenit (ryc. 1, 2 i 7). Kamacyt, niskoniklowy minerał FeNi, zawiera średnio 6,63 wt% Ni (6,1–7,1 wt% Ni) i 0,72 wt% Co (0,49–0,85 wt%). Taenit zawiera 33,4 wt% Ni (29,9–36,5 wt%) oraz 0,22 wt% Co (0,12–0,45 wt%). Nie zaobserwowano natomiast większych ziaren tetrataenitu (ryc. 7), który byłby typowym produktem równoważenia termicznego w chondrytach, towarzyszącym kamacytowi. Najprawdopodobniej jest to skutek nałożonej deformacji uderzeniowej, która doprowadziła do topienia i następnie przechłodzenia stopu kamacytowego. Skutkiem tego jest powstanie taenitu.

3.2. Charakterystyka petrograficzna i chemiczna meteorytu – klasyfikacja

Antonin należy do chondrytów zwyczajnych grupy L, o czym wnioskować można ze składu mineralów, a także z chemizmu globalnego. Chemizm globalny Antonina, obliczony w przybliżeniu poprzez zintegrowanie modalnego składu mineralnego (np. ryc. 2) i analiz składu mineralów w mikroobszarze (tab. 1) wyrażają proporcje Al/Si, Ca/Si, Mg/Si, Ni/Si i Fe/Ni charakterystyczne dla chondrytów grupy L (ryc. 8). Nieznaczne odchylenie od wartości literaturowych wynika z niedokładności analitycznej, siłą rzeczy narzuconej przez zastosowaną metodę. Korelacja Ca/Si i Mg/Si umieszcza Antonin w rejonie chondrytów niewęglistych (nieformalne określenie zbiorcze chondrytów zwyczajnych, enstatytowych i innych rzadkich grup pokrewnych). Korelacja proporcji Ni/Si i Fe/Si (ryc. 8b) pokazuje, że Antonin jest chondrytem o niskiej zawartości pierwiastków syderofilnych. Po-

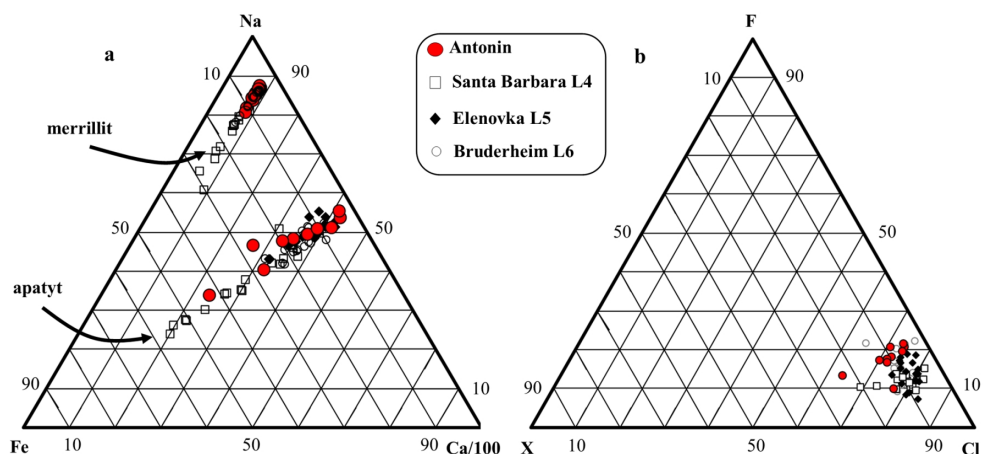
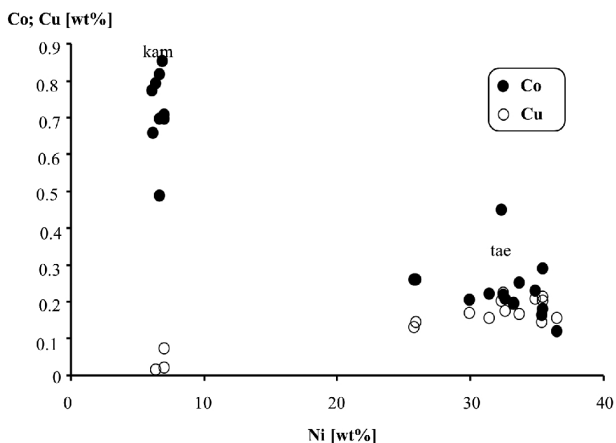


Fig. 6. Skład fosforanów (merrillitu i apatyty) pomierzony za pomocą mikrosondy elektronowej (EMPA). **a.** Zawartość Ca, Na i Fe w merrillicie i apatyty. **b.** Zawartość Cl i F i innego anionu (X) w apatyty. Zawartość Cl i F pomierzona, zawartość anionu X wyliczona na podstawie stechiometrii jako brakujący anion (najprawdopodobniej jest to OH lub anion oxyapatytowy). Dane literaturowe dla chondrytów L: Lewis i Jones 2016.

Fig. 6. Composition of phosphates (merrillite and apatite). **a.** Content of Ca, Na and Fe in both phosphates. **b.** Content of Cl, F and other anion in halogen site in apatite. Literature data: Lewis and Jones 2016.

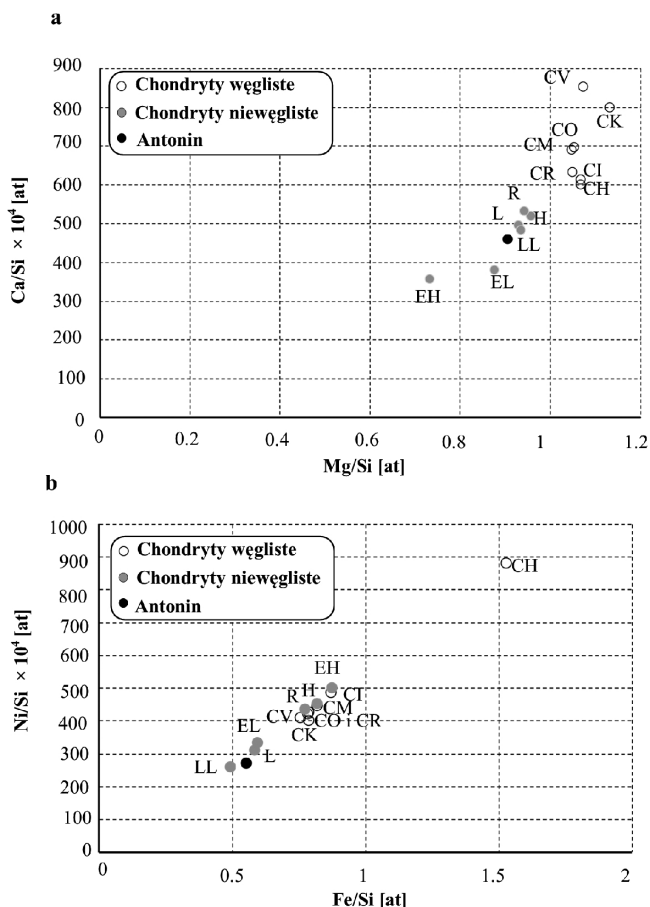
wyższe wskaźniki geochemiczne w wystarczającym stopniu łączą Antonin z chondrytami zwyczajnymi grupy L (Kallemeyn i in. 1989, Hutchison 2004).

Zrównoważenie składu minerałów głównych Antonina pozwala na klasyfikację chemiczną przy użyciu prostej korelacji zawartości Fe w krzemianach i Co w kamacycie. Wyniki uśrednionych analiz oliwinu i piroksenu plasują Antonin w środku zakresu typowego dla chondrytów L (ryc. 9a), podobnie jak korelacja składu oliwinu i kamacytu (ryc. 9b).



Ryc. 7. Zawartość Co i Cu w minerałach metalicznych, kamacycie (kam) i taenicie (tae) w próbce Antonina pomierzony za pomocą mikrosondy elektronowej EMPA.

Fig. 7. Co and Cu content in kamacite and taenite in Antonin.



Ryc. 8. Chemizm globalny (przybliżony) Antonina wyznaczony ze składu modalnego (wyznaczonego z obrazów SEM/BSE i SEM/EDX) i chemicznego składu mineralów (EMPA, tab. 1) oraz wyliczone proporcje atomowe Ca, Mg, Ni i Fe względem Si, diagnostyczne dla wyznaczenia typu materiału chondrytowego. **a.** Proporcje Ca/Si i Mg/Si chondrytu Antonin są podobne do tych typowych dla chondrytów niewęglistych (nieformalne określenie zbiorcze chondrytów zwyczajnych, enstatytowych i innych rzadkich grup pokrewnych). **b.** W przestrzeni Ni/Si i Fe/Si Antonin znajduje się wśród grup o niskiej zawartości pierwiastków syderofilnych. Powyższe wskaźniki geochemiczne w wystarczającym stopniu łączą Antonin z chondrytami zwyczajnymi grupy L. Dane literaturowe dla poszczególnych grup meteorytów: Kallemeyn i in. 1989; Hutchison 2004.

Fig. 8. Bulk chemical composition of Antonin calculated from modal mineral composition and chemical composition of minerals (Tab. 1) and diagnostic atomic ratios. **a.** Ca/Si versus Mg/Si diagram. Antonin plots in non-carbonaceous region, close to L chondrites. **b.** Ni/Si versus Fe/Si diagram. Antonin plots among chondrites low in siderophile elements, closest to L chondrites. Literature data from Kallemeyn et al. 1989, Hutchison 2004.

Klasyfikacja typu petrologicznego meteorytu Antonin jest mniej jednoznaczna i – z uwagi na naturę samego schematu klasyfikacyjnego – jest w pewnym sensie interpretacją przyjętą przez osobę klasyfikującą. Antonin został oficjalnie zaklasyfikowany jako chondryt typu petrograficzny 5, z uwagi na silne zrównoważenie składu krzemianów oliwину i piroksenu (ryc. 3). Zakres zmienności składu oliwину w Antoninie to 2 mol% Fa, wartość średnia to 24,4 mol% Fa, a odchylenie

Tabela 1. Skład modalny i przybliżony globalny skład chemiczny Antonina obliczony z proporcji minerałów w obrazach SEM/EDX i średniego składu minerałów wyznaczonego za pomocą mikroskopy elektronowej (EPMA).

Table 1. Modal composition of Antonin and calculated bulk chemical composition based on recalculatoin of modal composition from SEM/EDX and chemical composition of minerals as measured by EPMA.

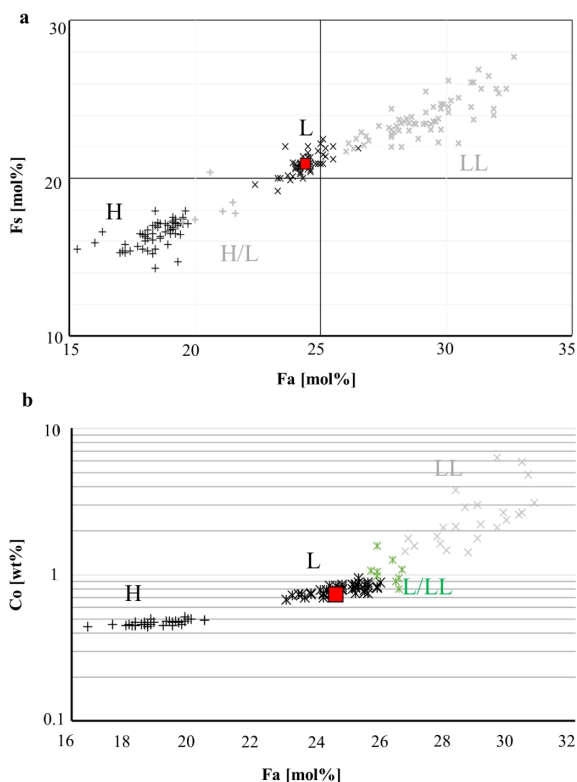
Skład modalny objętościowy i wagowy		Średni skład minerałów (wt% pierwiastka)																	
	pixele EDX	% obj	% wt *	Si	Ca	Ti	Fe	Mg	Mn	Ni	Cr	O	Co	Cu	P	Na	K	Al	S
ol	877603	43,28	40,51	17,86	0,02	17,32	23,14	0,37	0,03	0,04	40,70								
opx	659968	32,55	32,77	26,30	0,41	10,57	17,24	0,42		0,07	44,74								
di	112157	5,53	5,14	25,74	15,25	0,20	3,40	9,69	0,13	0,47	44,27					0,93	0,02	0,88	
plag	63145	3,12	2,35	30,44	1,04		1,84	1,70			48,06					7,06	0,95	9,74	
szk	126295	6,22	4,68	27,05	1,00		5,91	5,16			45,83					5,90	0,33	8,31	
fosf	9775	0,48	0,42	0,00	33,58	0,00	0,22	0,04	0,05		39,03				18,20	0,24			
chr	1988	0,10	0,13			1,15	21,65	2,16	0,51		39,88							3,73	
tr	121072	5,97	7,81				63,27			0,02									36,29
kam	28280	1,39	3,12				92,63			6,71			0,70						
tae	27442	1,35	3,07				65,64			33,26			0,20	0,19					
Chemizm globalny (wt%)																			
				Si	Ca	Ti	Fe	Mg	Mn	Ni	Cr	O	Co	Cu	P	Na	K	Al	S
				19,4	1,13	0	20,9	15,7	0,3	1,02	0,12	37,1	0	0	0,08	0,5	0,1	0,7	2,84

* gęstość minerałów [g/cm³]:
 ol: 3,3; opx: 3,55; di: 3,28;
 pl: 2,65; szk: 2,2; fosf: 3,07;
 chr: 4,79; tr: 4,61; kam: 7,9;
 tae: 8.

Tabela 2. Zapis deformacji szokowej w ziarnach oliwiny w dwóch próbkach meteorytu Antonin. Liczba ziaren o danym stopniu deformacji S1-S6 oraz ich procentowa frakcja.

Table 2. Shock index of two random populations of olivine grains in Antonin. Number of grains with each shock index, their percentage in whole population and assigned shock degree based on it.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Suma	%S1	%S2	%S3	%S4	%S5	%S6	Przypisany indeks szokowy
Antonin 1	5	16	28	12	0	0	58	8,6%	27,6%	48,3%	20,7%	0%	0%	S3
Antonin 2	6	30	43	18	1	0	98	6,1%	30,6%	43,9%	18,4%	1,0%	0%	S3



Ryc. 9. Klasyfikacja Antonina na podstawie składu (zrównoważonego) oliwiny, niskowapniowego piroksenu i kamacytu. **a.** Zawartość fajalitu w oliwinie i ferrosilitu w piroksenie umiejscawiają Antonin wewnątrz pola typowego dla chondrytów L. **b.** Zawartość Co w kamacycie odpowiada typowemu składowi chondrytu L i koresponduje z zawartością Fe w krzemianach. Dane literaturowe dla chondrytów H, L, LL i L/LL: Rubin 1990; Brearley i Jones 1998.

Fig. 9. Classification of Antonin based on composition of olivine, low-Ca pyroxene and kamacite. **a.** *Fs* in pyroxene versus *Fa* in olivine plot with Antonin fitting among L chondrites. **b.** *Co* in kamacite versus *Fa* in olivine. Antonin plots among L chondrites. Literature data for H, L, LL and L/LL chondrites: Rubin 1990; Brearley and Jones 1998.

standardowe to 0,3 mol% *Fa*. Porównanie tych wartości z kompilacją danych zebranych dla 130 chondrytów, wykonaną przez Rubina (1990), pokazuje, że Antonin jest bliski chemicznie chondrytom L typu 5, dla których wartości wynoszą 24,7 mol% *Fa*, i odchylenie 0,8 mol% *Fa*. Podobnie, zawartość Ni i Co w kamacycie są dość typowe dla chondrytów typu L. W rzeczywistości, zawartości Ni mogą sugerować nawet wyższy stopień zrównoważenia, podczas gdy zawartości Co są bardziej zmienne i mogłyby być przedmiotem dyskusji dotyczącej dokładnej klasyfikacji.

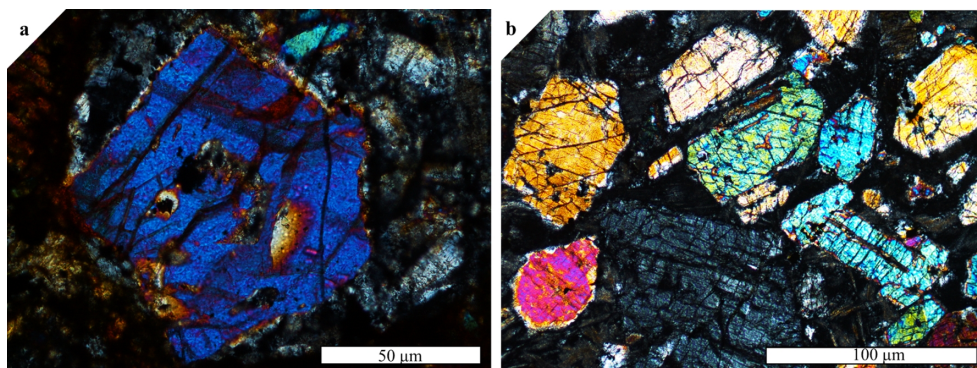
Dla porównania, zawartość cząsteczki fajalitowej w oliwinie w meteorycie Pułtusk dla typu H5 waha się w zakresie 3 mol%, a dla typów niższych, H4 zmienność składu wynosi ponad 5 mol% (histogramy przedstawione na Fig. 3 artykułu dotyczącego reklasyfikacji meteorytu Pułtusk w *Geological Quarterly*, Krześcińska 2016).

Cechy teksturalne Antonina sugerują zrównoważenie w stopniu 4 lub 5. Szczególnie drobny rozmiar ziarna plagioklastu (pomimo zrównoważonego składu) i obecność zachowanych gdzieś chondr wskazują, że lokalnie materiał ten nie jest teksturalnie dojrzały. Na przekrojach meteorytu, badanych przez Bischoffa i in. (2022) niedojrzałość teksturalna widoczna jest nawet bardziej niż w próbkę analizowanej przez nasz zespół i powyżsi autorzy skłaniają się do sklasyfikowania Antonina jako typ petrologiczny 4. Ta różnica interpretacji jest omówiona poniżej, ponieważ prawdopodobnie wskazuje na interesującą cechę Antonina w zakresie jego historii deformacyjnej.

3.3. Struktury deformacyjne (szokowe) w meteorycie

Deformacja uderzeniowa Antonina oszacowana została na podstawie analizy ziaren oliwinu, a także struktur lokalnego topienia nierównowagowego. Zanalizowane były dwie próby losowo wybranych ziaren oliwinu liczące 58 ziaren i 98 ziaren (tab. 2). W przypadku obydwu analizowanych populacji, poszczególne ziarna pokazywały deformację w stopniu S1, S2, S3 lub S4. Najbardziej typową deformacją jest S3, czyli obecność ziaren o falistym wygaszaniu światła oraz wyraźnych zespołach planarnych spękań (ryc. 10b). Dość liczna frakcja ziaren oliwinu (około 20%) wykazuje cechy typowe dla stopnia S4, czyli mozaikowe wygaszanie światła i obecność podziarn mniejszych niż odstępów pomiędzy poszczególnymi spękaniem planarnymi (ryc. 10b). Zgodnie ze schematem klasyfikacyjnym, Antoninowi przypisany został stopień szokowy S3, ponieważ 43–48% ziaren wykazywało deformację S3. Około 18–20% ziaren charakteryzuje się deformacją S4, jest to jednak poniżej 25% populacji, a zatem nie wpływa na podwyższenie indeksu szokowego.

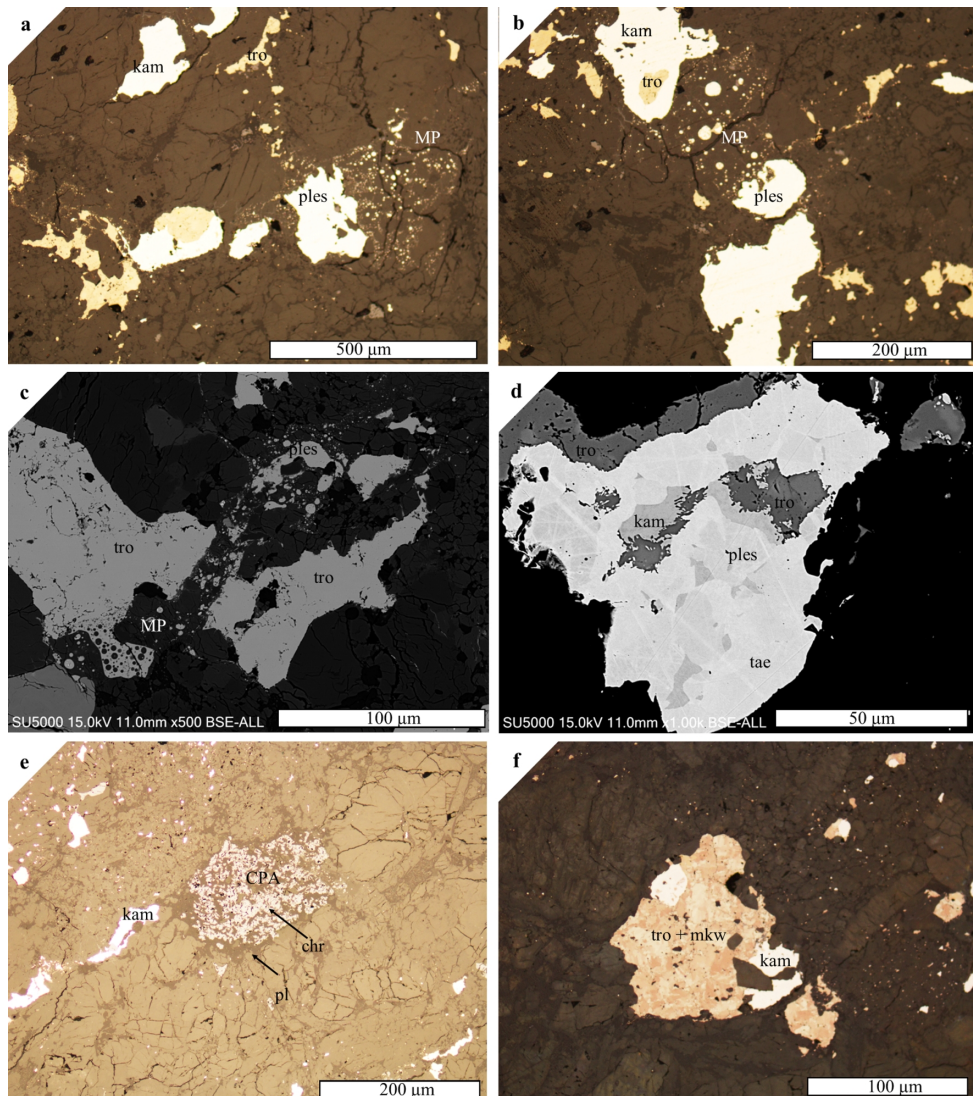
W płytce cienkiej Antonina obecnych jest wiele struktur sugerujących lokalne topienie uderzeniowe następujące wskutek kumulacji fali uderzeniowej na kontak-



Ryc. 10. Przykładowe ziarna oliwinu z zapisem kruchej deformacji szokowej. **a.** ziarno o stopniu deformacji S2. **b.** ziarna o stopniu S3 i nieliczne S4 (ziarno w centrum obrazu) zawierające liczne spękania planarne oraz podziarna o rozmiarach mniejszych niż rozmieszczenie spękań. Obrazy mikroskopowe w świetle przechodzącym spolaryzowanym.

Fig. 10. Example shocked olivine grains. **a.** Grain assigned S2 index. **b.** Grains with S3 deformation index and S4 (grain in the center). Microphotographs in cross-polarized light.

tach faz o różnej gęstości. W szczególności, obecne są kieszenie stopowe, zbudowane ze szkliwa skaleniowego i globulek metalu i siarczków (ryc. 11a–c). Kieszenie takie osiągają rozmiary do 300 μm i zazwyczaj kontaktują z ziarnami metalu o strukturze plessytowej, czyli przerostami kamacytu i taenitu z zawartością Ni na

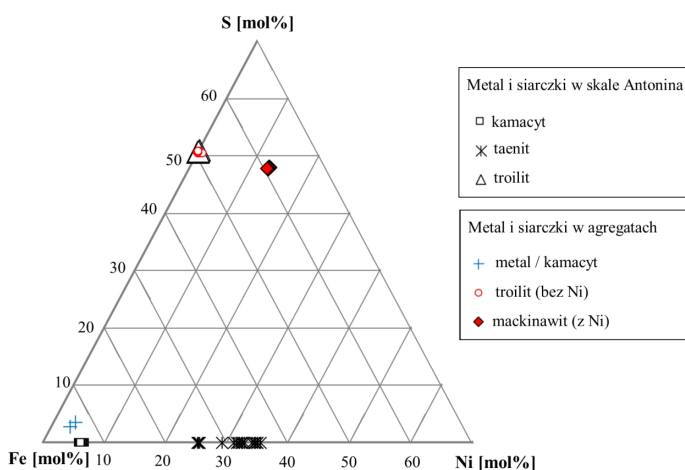


Ryc. 11. Struktury szokowe, wskazujące na lokalne, poudzerzeniowe topienie w skale Antonina. **a–b.** Kieszenie stopu impaktowego (MP, ang. melt pockets) tworzące się na kontaktach plagioklazu i metalu. Obrazy mikroskopowe w świetle odbitym. **c.** Kieszeń stopowa w obrazie SEM/BSE. **d.** ziarna plessytu, obraz SEM/BSE. **e.** Agregaty chromitowo-plagioklazowe, obraz mikroskopowy w świetle odbitym. **f.** agregaty troilitowo-mackinawitowe, obraz mikroskopowy w świetle odbitym.

Fig. 11. Structures of localised shock melting in Antonin. **a–b** Impact melt pockets at plagioclase-metal contacts. Microphotographs in reflected light. **c.** Melt pocket in SEM/BSE. **d.** Plessite grain, SEM/BSE image. **e.** Chromite-plagioclase assemblage, microphotograph in reflected light. **f.** troilite-mackinawite assemblage, microphotograph in reflected light.

poziomie 25–35 wt%. Ziarna plessytu na kontakcie z kieszeniami stopowymi noszą wyraźne ślady korozji podczas topienia, pokazując, że obydwie produkty powstały w tym samym procesie. Obecne są także agregaty chromitowo-plagioklazowe (ryc. 11e), które powstają wskutek korodowania chromitu przez stop plagioklazowy powstały podczas szokowego topienia (Rubin 2004).

Oprócz śladów kruchej i plastyczno-kruchej deformacji ziaren oliwinu oraz wskaźników nierównowagowego topienia, w Antoninie widoczne są skutki podwyższonych temperatur oddziałujących na skałę po ustaniu ciśnienia szokowych. Duża frakcja troilitu wykazuje porowatą strukturę (ryc. 11a, c), którą łączyć należy z dekompozycją siarczku i ulatnianiem się siarki. Dodatkowo, obecne są agregaty zbudowane z troilitu i mackinawitu (ryc. 11f). Są one dość nierównomiernie rozłożone w próbce. Domeny poszczególnych siarczkwów w agregatach mają rozmiary 10–20 μm . Domeny troilitowe w agregatach mają skład identyczny z troilitem, tworzącym porowate ziarna (ryc. 12): 62,5 wt% Fe, 36,5–37 wt% S. Mogą jednak zawierać do 0,5 wt% Ni oraz śladową zawartość Cu (0,1 wt%) i Co (0,1 wt%). Mackinawit w takich agregatach zawiera 48–49 wt% Fe, 16 wt% Ni, 34 wt% S oraz znaczną domieszkę Cu, aż do 0,8 wt% i niewielką domieszkę Co (0,08 wt%).



Ryc. 12. Skład troilitu i mackinawitu w meteorycie Antonin. Diagram trójkątny pokazuje pomierzony skład obydwu siarczkwów i różnicę w zawartości Ni, oraz deficyt S w mackinawicie, w porównaniu z troilitem.

Fig. 12. Composition of troilite and mackinawite in Antonin. Ternary diagram shows different Ni and S content of the two sulfides.

3.4. Indeks szokowy – klasyfikacja

Rozkład deformacji ziaren oliwinu pozwala zaklasyfikować stopień szokowy Antonina jako S3. Deformacja jest heterogeniczna, co jest typowe dla procesu uderzeniowego. Zaznacza się jednak spora ilość ziaren o stopniu deformacji S4, rozłożonych dość nierównomiernie w próbce. Lokalne ślady wyższych ciśnień wskazują, że meteoryt uległ umiarkowanej lub silnej kolizji. Średnia deformacja

w Antoninie jest nieco łagodniejsza, wskazując na możliwość epizodu odprężania pomiędzy potencjalnie dwiema kolizjami, zatem chondryt mógł doświadczyć dwóch kolizji i epizodu odprężania pomiędzy nimi lub też doświadczył deformacji o bardzo heterogenicznym przebiegu.

4. Dyskusja

Meteoryt Antonin to dwudziesty drugi oficjalnie zarejestrowany polski meteoryt (Meteoritical Bulletin³). Jest to chondryt zwyczajny. Dla Antonina wykonana została rekonstrukcja orbity heliocentrycznej dzięki zapisowi z kamer bolidowych (Shrbený i in. 2022), co czyni Antonin jednym z nielicznych przypadków w skali światowej.

4.1. Historia termiczna i kolizyjna zapisana w meteorycie Antonin

Charakterystyka meteorytu Antonin wykonana dla celów klasyfikacji może posłużyć zarysowaniu procesów, jakich skała doświadczyła na ciele macierzystym. Niemal każdy meteoryt posiada cechy, które wykraczają poza ramy klasyfikacyjne, bo trudno oczekiwać, aby naturalne procesy przebiegały w sposób dający się ująć w uproszczony schemat. Celem klasyfikacji jest więc także wskazanie unikatowych cech meteorytu, które potencjalnie mogą stać się przedmiotem dociekań naukowych. Jest to szczególnie ważne dla meteorytów z rejestracji bolidu, bo dokładniejsze rozumienie ich ewolucji na ciele macierzystym może być odniesione do danych dotyczących źródłowych obszarów ciała.

W przypadku Antonina wyraźnie zaznacza się jego niejednoznaczny stopień zrównoważenia termicznego i brak zgodności pomiędzy zrównoważeniem tekstury i składu chemicznego. Teksturalnie Antonin wykazuje wiele cech meteorytu, który przeszedł minimalną obróbkę termiczną i metamorficzną. Chemicznie jednak jest bardzo jednorodny. Na podstawie wskaźników ilościowych, bazujących na chemizmie minerałów, nasz zespół sklasyfikował Antonin jako chondryt L5 (Shrbený i in. 2022), jednak prace prowadzone równoległe przez inny zespół (Bischoff i in. 2022) doprowadziły tych autorów do wniosku, że Antonin jest chondrytem L4-5. Bazując na wskaźnikach teksturalnych takich jak ilość zachowanego szkliwa, taka klasyfikacja jest uzasadniona a różnica interpretacji może odzwierciedlać historię ciała macierzystego chondrytu.

Patrząc na deformację uderzeniową Antonina, wydaje się, że taka pozorna niezgodność może mieć swoje źródło w sprzężeniu procesów termicznych (opisanych w klasyfikacji przez typ petrograficzny 4 lub 5) z procesami szokowymi. Procesy uderzeniowe w chondrytach wywołują zmiany termiczne, niejako nałożone na skutki metamorfizmu akrecyjnego (Ruzicka i in. 2015; Krzesińska i in. 2019) i stąd możliwe jest, że w Antoninie zrównoważenie składu mogło nastąpić częściowo wskutek poudzeniowego równoważenia a nie procesu akrecyjnego. W zgodzie z taką interpretacją może być fakt, że deformacja oliwinów w Antoninie

³ <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=77489>

nie jest silnie zaawansowana (S3), ale meteoryt zawiera liczne produkty lokalnego topnienia takie jak kieszenie stopowe, ziarna plessytu czy agregaty chromitowo-plagioklazowe. Co więcej, zawiera on przerosty siarczkowe, które prawdopodobnie są również produktem topienia i gwałtownego poudarzeniowego równoważenia termicznego ze skałą, która nie doświadczyła wzrostu temperatury (Rubin 1997).

Pod uwagę trzeba wziąć także procesy metasomatyczne, czyli procesy zachodzące wskutek cyrkulacji fluidów. W przypadku Antonina fluidy odegrały prawdopodobnie dużą rolę, biorąc pod uwagę rozmiar ziaren fosforanów (por. Lewis i Jones 2016; Krzesińska 2017). Procesy fluidalne są zupełnie pomijane w klasyfikacji i często nie otrzymują dostatecznej uwagi w rozważaniach na temat ewolucji ciał macierzystych chondrytów zwyczajnych. W przypadku Antonina może jednak istnieć zależność pomiędzy obecnością fluidów a zapisem metamorfizmu uderzeniowego i termicznego równoważenia. Podsumowując więc, parametry klasyfikacyjne w Antoninie wydają się nie odzwierciedlać odrębnych procesów w jego ewolucji, a są raczej wypadkową współdziałania ciśnień uderzeniowych, temperatur i fluidów krążących na pewnym etapie ewolucji ciała macierzystego. Prowadzone są dalsze badania w tym zakresie.

5. Podsumowanie

- Meteoryt Antonin to chondryt L5 S3, lokalnie wykazujący cechy mniej zrównoważonego materiału L4 i być może wyższego stopnia deformacji S4.
- Skała przeszła interesującą historię termiczną i kolizyjną na ciele macierzystym. Robocza hipoteza, będąca na etapie testowania, jest taka, że Antonin doświadczył wczesnego silnego wydarzenia impaktowego, po którym nastąpiło intensywne (choć niejednorodne) równoważenie termiczne i, być może, cyrkulacja fluidów. Oprócz tego, Antonin mógł doświadczyć łagodnej kolizji na późniejszym etapie.
- Oprócz interesujących cech strukturalnych i chemicznych, meteoryt ten jest ogromnie istotny dla nauki z uwagi na fakt, że zarejestrowane zostało jego przejście przez atmosferę. Trajektoria pozwoliła na rekonstrukcję heliocentrycznej orbity ciała macierzystego meteorytu. Obecnie w kolekcjach światowych istnieje zaledwie 46 meteorytów, dla których znane są orbity heliocentryczne. Są one cennym źródłem informacji o dynamice ciał pasa planetoid.

Podziękowania

Dziękuję znalazcy oraz kolegom z Polskiego Towarzystwa Meteorologicznego za przekazanie meteorytu do klasyfikacji. W szczególności dziękuję Zbyszkowi Tymińskiemu za dystrybucję materiału badawczego, włączając przygotowanie depozytu naukowego oraz fragmentów do klasyfikacji. Dziękuję także Prof. Krzysztofowi Szopie za przekazane w recenzji uwagi do pierwotnej wersji manuskryptu.

Streszczenie

Meteoryt Antonin spadł 15 lipca 2021 roku w Polsce, a jego spadek był zarejestrowany przez kamery Europejskiej Sieci Bolidowej, obsługiwanej przez Instytut Astronomiczny Akademii Nauk Republiki Czeskiej. Krótko po spadku, meteoryt został odnaleziony i przekazany do klasyfikacji i rejestracji.

Antonin jest chondrytem zwyczajnym, sklasyfikowanym jako L5 o stopniu deformacji uderzeniowej S3 lub S4. W poniższej pracy udokumentowana jest heterogeniczna tekstura chondrytu oraz struktury deformacyjne. Ponadto zawarte są wyniki analiz składu chemicznego minerałów: oliwinu, niskowapniowego piroksenu, diopsydu i szkliv, fosforanów, chromitu i ilmenitu, a także siarczków i minerałów metalicznych. Minerale te różnią się między sobą stopniem zrównowazenia.

Analiza struktury i składu chemicznego pozwala na dyskusję nad klasyfikacją Antonina, a także na zarysowanie procesów termicznych i kolizyjnych, jakich ten meteoryt doświadczył na ciele macierzystym.

Słowa kluczowe: Antonin, chondryt L5

Literatura

- Bischoff A., Patzek M., Peters S.T.M., Barrat J.-A., Di Rocco T., Pack A., Ebert S., Jansen C.A., Kmiciek K., 2022, *The chondrite breccia of Antonin (L4-5) – A new meteorite fall from Poland with a heterogeneous distribution of metal*, Meteoritics and Planetary Science, 57, s. 2127–2142.
- Brearley A.J., Jones R.H., 1998, *Chondritic meteorites*, in: J.J. Papike (Ed.), Planetary materials. Reviews in Mineralogy, 36, s. 3-1–3-398, Washington, Mineralogical Society of America.
- Bunch T.E., Keil K., Snetsinger K.G., 1968, *Chromite composition in relation to chemistry and texture of ordinary chondrites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 31, s. 1569–1582.
- Huss G.R., Rubin A.E., Grossman J.N., 2006 *Thermal metamorphism in chondrites. Meteorites and the Early Solar System II*, in: D.S. Lauretta, and H.Y. McSween, Jr. (Eds.), Meteorites and the Early Solar System II, 567–586, The University of Arizona Press.
- Hutchison R. 2004, *Meteorites: A Petrologic chemical and Isotopic Synthesis*, Cambridge University Press Cambridge United Kingdom, 506pp.
- Jamsja N., Ruzicka A. 2010, *Shock and thermal history of Northwest Africa 4859 an annealed impact-melt breccia of LL chondrite parentage containing unusual igneous features and pentlandite*, Meteoritics and Planetary Science, 45, s. 828–849.
- Kallemeyn G.W., Rubin A.E., Wang D., Wasson J.T., 1989, *Ordinary chondrites: Bulk compositions classification lithophile-element fractionations and composition-petrographic type relationships*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 53, s. 2747–2767.
- Kessel R., Beckett J.R., Stolper E.M., 2007, *The thermal history of equilibrated ordinary chondrites and the relationship between textural maturity and temperature*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, s. 1855–1881.
- Krześcińska A.M., 2016, *Thermal metamorphic evolution of the Pultusk H chondrite breccia – compositional and textural properties not included in petrological classification*, Geological Quarterly, 60, s. 211–224.
- Krześcińska A.M., 2017, *Contribution of early impact events to metal-silicate separation thermal annealing and volatile redistribution: evidence in the Pultusk H chondrite*, Meteoritics and Planetary Science, 52, s. 2305–2321.

- Krzysińska A.M., Wirth R., Kusiak M.A., 2019, *Petrogenesis of ungrouped enstatite meteorite Zakłodzie: fabric, texture and nanostructure analysis for identification of mechanisms responsible for chondrite-achondrite transition*, *Meteoritics and Planetary Science*, 54, s. 1462–1477.
- Lewis J.A., Jones R.H., 2016, *Phosphate and feldspar mineralogy of equilibrated L chondrites: The record of metasomatism during metamorphism in ordinary chondrite parent bodies*, *Meteoritics and Planetary Science*, 51, s. 1886–1913.
- Morys J., Żmija M., 2022, *Spadki meteorytów w latach 2020-2021. Okoliczności i obserwacje*, *Acta Societatis Meteorologicae Polonorum*, 13, s. 67–106.
- Owczarzak A., 2021, *Nowy spadek w Polsce*, *Meteoryt*, 101, s. 15.
- Rubin A.E., 1990, *Kamacite and olivine in ordinary chondrites: intergroup and intragroup relationships*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, s. 1217–1232.
- Rubin A.E., 1997, *Mineralogy of meteorite groups*, *Meteoritics and Planetary Science*, 32, s. 231–247.
- Rubin A.E., 2004, *Postshock annealing and postannealing shock in equilibrated ordinary chondrites: implications for the thermal and shock histories of chondritic asteroids*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, s. 673–689.
- Ruzicka A., Hugo R., Hutson M., 2015, *Deformation and thermal histories of ordinary chondrites: Evidence for post-deformation annealing and syn-metamorphic shock*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 163, s. 219–233.
- Sears D.W.G., Dodd R.T., 1988, *Overview and classification of meteorites*, in: J.F. Kerridge and M.S. Matthews (Eds), *Meteorites and the Early Solar System*, 3–31. University of Arizona Press; Tucson, Arizona.
- Shrbený L., Spurný P., Borovička J., 2020, *Fireball fragmentation in the first half of the atmospheric trajectory*. *Planetary and Space Science* Volume 187 article id. 104956.
- Shrbený L., Krzysińska A.M., Borovička J., Spurný P., Tymiński Z., Kmieciak K., 2022, *Analysis of the daylight fireball of July 15, 2021, leading to meteorite fall and find near Antonin, Poland, and description of the recovered chondrite*, *Meteoritics and Planetary Science*, 57, s. 2108–2126.
- Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D., 1991, *Shock metamorphism in ordinary chondrites*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, s. 3845–3867.
- Tymiński Z., Burakowska A., Krzysińska A.M., Tymińska K., Kuć M., Iller E., Kmieciak K., 2023, *Radionuklidy kosmogeniczne w meteorycie Antonin*, *Acta Societatis Meteorologicae Polonorum*, 14, s. 192–199.
- Van Schmus W.R., Wood J., 1967, *A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, s. 747–765.

Strony internetowe

Klasyfikacja i rejestracja Antonina w Meteoritical Bulletin:

<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=77489>

Raport z rejestracji bolidu Mikstat/Antonin:

http://www.asu.cas.cz/~meteor/bolid/2021_07_15/