

## Chondryt Antonin – pierwszy polski meteoryt ze zrekonstruowaną orbitą wokółsłoneczną. Raport z klasyfikacji i rejestracji oraz propozycje działań mogących wzbogacić kolekcję polskich meteorytów

Agata Krzezińska<sup>1</sup>, Zbigniew Tymiński<sup>2,3</sup>, Roksana Maćkowska<sup>4</sup>



A. Krzezińska



Z. Tymiński



R. Maćkowska

**The Antonin Chondrite – the first Polish meteorite with reconstructed pre-atmospheric orbit. Report on registration and classification, including proposals for measures to expand the Polish meteorite collection.** Prz. Geol., 71: 372–385; doi: 10.7306/2023.33

*Abstract.* On July 15, 2021, a bright fireball was registered over Poland and it led to a meteorite fall near the towns of Antonin and Mikstat, on the border of the Greater Poland and Lower Silesia voivodeships. Soon after registration of the bolide, a meteorite fragment was found. Observation of the fireball's trajectory helped to reconstruct the pre-atmospheric parameters of the meteoroid, such as the orbit inclination or eccentricity (Shrbený et al., 2022). Additionally, finding of the meteorite fragment

enabled petrographic research and reconstruction of the thermal and collisional history of meteorite's parent body. The Antonin meteorite is the first Polish meteorite with the reconstructed pre-atmospheric orbit and, at the moment, one of only fifty in the world. It is an L5 ordinary chondrite (Shrbený et al., 2022; Krzezińska, 2023). Here we present a report on the classification and registration process of the Antonin meteorite. Registration included measurements of cosmogenic isotope, necessary to prove the connection of the meteorite with the observed bolide. The specimen was found during the private expedition, so no direct proof existed for find in the predicted fall area. Cosmogenic isotope study allowed to assessing the time of meteorite fall, which matched the fireball event. Classification included petrographic and mineralogical analysis of the rock. The fall and find circumstances of Antonin allowed us to reflect on the lack of awareness of the Polish society regarding meteorites. Such unawareness is also seen when the whole collection of Polish meteorites is statistically analysed. We present such analysis at the end of the paper, and conclude that many meteorite falls in Poland must be unnoticed. Additionally, inability of citizens to recognize a meteorite, especially a chondrite, causes that many of these rocks remain unrecovered. The aim of this paper is to inspire the reader to pay attention to falls of meteorites, and to look for potential meteorite rocks. In final, we encourage the readers to get involved in activities of fireball networks and to take part in meteorite recovery trips.

**Keywords:** meteorite, chondrite, meteorite fall, Polish meteorites, fireball

Każdego dnia w atmosferę ziemską wchodzi niemal 100 t materiału pozaziemskiego (Halliday, 2001; Hutchison, 2004). W większości są to mikrometrowej wielkości obiekty, które wskutek interakcji z powietrzem (głównie gwałtownej kompresji gazu) całkowicie ulegają ablacji. Pewna część materiału ma jednak na tyle dużą masę wejściową, że dociera do powierzchni Ziemi w postaci meteorytów – skał pozaziemskich o co najmniej kilkucentymetrowej wielkości.

Oszacowanie ilości materiału docierającego do powierzchni Ziemi nie jest proste, głównie dlatego, że spadki meteorytów często pozostają niezauważone, szczególnie na obszarach o niskiej gęstości zaludnienia. Naoczna obserwacja spadku meteorytu oraz znalezienie fragmentów po takim spadku ma miejsce średnio zaledwie 10–20 razy w roku w skali świata (Bland, 2001; Halliday, 2001; Hutchison, 2004). Działalność sieci bolidowych, czyli sieci kamer nastawionych na monitorowanie meteorów i rekonstrukcję prawdopodobnego obszaru rozrzutu meteorytów pokazuje, że spadki mają miejsce co najmniej o rząd

wielkości częściej. Biorąc pod uwagę ilość zachowanych meteorytów kopalnych, możliwe, że do Ziemi dociera rocznie nawet 17 tys. meteorytów o masie rzędu od 50 g do 10 kg (Evatt i in., 2020). Przykładem ilustrującym rzeczywistą częstość spadków może być luty 2023, gdy na przestrzeni tygodnia zarejestrowano na świecie trzy bolidy (Matera, Włochy; Saint-Pierre-le-Viger, Normandia, Francja oraz spadek w Teksasie, USA) i z sukcesem odnaleziono fragmenty meteorytów.

Meteoryty niezauważone przy spadku jedynie w rzadkich przypadkach bywają znalezione później. Wynika to głównie z faktu, że – z uwagi na swój skład chemiczny i mineralny – meteoryty ulegają szybkiemu wietrzeniu i dezintegracji. Dla przykładu, szacuje się, że w klimacie europejskim całkowity rozpad meteorytów, szczególnie kamiennych, następuje na przestrzeni kilkuset–kilku tysięcy lat (Jull, 2011). Aby zapobiec niszczeniu meteorytów i zwiększyć szanse na ich podnoszenie, na arenie światowej obecnie silnie rozwijają się sieci bolidowe umożliwiające obserwację jak największej ilości spadków meteorytowych.

<sup>1</sup> Centre for Earth Evolution and Dynamics (obecnie Centre for Planetary Habitability), Department of Geosciences, University of Oslo, Sem Salands vei 2, 0371 Oslo, Norwegia; [a.m.krzesinska@geo.uio.no](mailto:a.m.krzesinska@geo.uio.no); ORCID ID: 0000-0002-0896-3560

<sup>2</sup> Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Ośrodek Radioizotopów POLATOM, ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk; [zbigniew.tyminski@polatom.pl](mailto:zbigniew.tyminski@polatom.pl); ORCID ID: 0000-0001-9977-4150

<sup>3</sup> Polska Sieć Bolidowa, Pracownia Komet i Meteorów, ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa.

<sup>4</sup> Muzeum Ziemi PAN, al. Na Skarpie 20/26, 27. 00-488 Warszawa; [geouniwersytet@gmail.com](mailto:geouniwersytet@gmail.com); ORCID ID: 0009-0007-0640-526X

Dodatkowo w wielu krajach można zauważyć inwestycje w programy oraz wszelkiego typu działania naukowe i edukacyjne zmierzające ku większemu sukcesowi w odnajdowaniu fragmentów pozostałych po spadku.

W poniższym artykule przedstawiamy raport z klasyfikacji i rejestracji najnowszego polskiego meteorytu – Antonin. Meteoryt ten spadł w dniu 15 lipca 2021 r., a jego przelot przez atmosferę został zaobserwowany przez czeskie stacje Europejskiej Sieci Bolidowej (EN). Na podstawie wykonanych obliczeń trajektorii lotu, niecałe dwa tygodnie po spadku został odnaleziony pierwszy i jak dotąd jedyny fragment meteorytu. Nasz zespół przeprowadził klasyfikację i rejestrację meteorytu, która zakończyła się w maju 2022 r. (Shrbený i in., 2002; Krzesińska, 2023; Tymiński i in., 2023b).

Celem poniższej pracy jest przede wszystkim zwrócenie uwagi czytelnika na fakt spadku meteorytu w Polsce, przybliżenie jego charakterystyki, a także podzielenie się refleksjami, jakie pojawiły się podczas prac nad jego rejestracją.

## SPADEK METEORYTU ANTONIN

### Obserwacja bolidu

O poranku 15 lipca 2021 r. kamery Europejskiej Sieci Bolidowej, obsługiwanej przez Instytut Astronomiczny Akademii Nauk Republiki Czeskiej (Astronomický ústav AV ČR Ondřejov, IA CAS) zarejestrowały przelot bolidu nad południowo-zachodnią Polską. Pomimo bliskiego wschodu słońca i tym samym dość jasnego nieba, trajektoria meteoru była dość dobrze widoczna (ryc. 1A). Na terytorium Polski działa Polska Sieć Bolidowa (PFN), która prowadzi regularne obserwacje meteorów, ale w przypadku Antonina sieć nie dokonała zapisu bolidu z powodu silnego zachmurzenia nad Polską tego dnia. Również zapisy z czeskich kamer były niekompletne z powodu warstw zalegających chmur (tzn. nie ma zapisu końcowej fazy przelotu bolidu). Jednak grupa naukowców z IA CAS (Lukáš Shrbený, Jiří Borovička i Pavel Spurný), wyznaczyła parametry przelotu meteoroidu w atmosferze oraz obliczyła prawdopodobny obszar rozrzutu meteorytów (Shrbený i in., 2022). Dane te zostały po kilku dniach opublikowane na stronach IA CAS ([www.asu.cas.cz/~meteor/bolid/2021\\_07\\_15/](http://www.asu.cas.cz/~meteor/bolid/2021_07_15/)). Przewidziano, że do Ziemi mogło dotrzeć maksymalnie 10 kg materii meteorytowej, która spadła w okolicach miasteczek Mikstat i Antonin w województwie wielkopolskim (ryc. 1B).

### Odnalezienie fragmentu meteorytu

Po udostępnieniu danych dotyczących prawdopodobnej lokalizacji pola spadku meteorytów zostały natychmiast podjęte próby penetracji wskazanego terenu. Do poszukiwania przystąpili polscy poszukiwacze prywatni i kolekcjonerzy meteorytów a także zagraniczni naukowcy.

Trzeba zaznaczyć, że próby takie – choć być może na pierwszy rzut oka sprawiają wrażenie prostych – w rzeczywistości wymagają dużego nakładu energii i czasu, a szanse powodzenia są raczej niewielkie. Do zrozumienia skali trudności, z jakimi potrzeba się zmierzyć podczas poszukiwań, niech posłuży poniższy obraz: obszar potencjalnego miejsca rozrzutu meteorytów ma rozmiar ok. 7 km × 1 km (ryc. 1B). Jest to teren zalesiony, częściowo zabudowany i zamieszkały, a także obejmujący łąki i pola orne. Sam meteoryt, zgodnie z przewidywaniami wynikającymi z obserwacji bolidu, to prawdopodobnie fragment wielkości dużego jabłka lub kilka mniejszych kawałków rozsianych w obszarze spadku. Mało prawdopodobne jest, aby ich przelot spowodował wyraźne uszkodzenia drzew lub budynków, zatem nie można spodziewać się specjalnie widocznych znaków w terenie poszukiwań. Poszukiwanie meteorytu wymaga zatem nakładu czasu w celu systematycznego przeszukania całego obszaru prawdopodobnego spadku.

Dzięki doświadczeniu poszukiwaczy, a także w dużej mierze szczęściu, dnia 2 sierpnia 2021 r. udało się odnaleźć jeden okaz o wadze 350 g (ryc. 2). Fragment został znaleziony w obrębie pola spadku, dokładnie w miejscu, gdzie przewidywano taką masę, jaką ma odnaleziony meteoryt. Pokazuje to, że założenia dotyczące fragmentacji meteoroidu są poprawne, stąd też przeczecucia, co do pozostałych fragmentów potencjalnie znajdujących się w obszarze spadku, prawdopodobnie są także realne<sup>5</sup>. Należy zatem oczekiwać, że w obszarze tym pozostaje jeszcze kilka podobnej wielkości fragmentów. Niestety do dziś nie został odnaleziony żaden inny okaz.

Fragment meteorytu znaleziony został przez p. Kryspina Kmiecika, a współtowarzyszami wyprawy byli p. Andrzej Owczarzak, p. Michał Nebelski oraz p. Jędrzej Kmiecik. Z wyprawy poszukiwawczej zostały opublikowane raporty, które można znaleźć na stronach internetowych ([cosmoartel.pl](http://cosmoartel.pl), [woreczko.pl](http://woreczko.pl)) oraz w periodyku *Meteor* (Owczarzak, 2021). Niestety – częściowo z powodu trwającej pandemii COVID-19 – nie została podjęta żadna ekspedycja poszukiwawcza kierowana przez polskich naukowców, a zatem jedyny odnaleziony fragment meteorytu pozostaje własnością prywatną.

Meteoryt leżał wciśnięty w polną drogę, w okolicach miejscowości Antonin i Mikstat (bliżej Antonina i stąd jego nazwa). Wyniki przeprowadzonych prób (Bingoraj, informacja ustna 2021) wskazują, że przed znalezieniem prawdopodobnie przejechał po nim samochód. Jest to okaz niemal w całości pokryty skorupą obtopieniową (ryc. 2). W chwili znalezienia na skorupie były widoczne zarysowania, które prawdopodobnie powstały w momencie otarcia skały o drzewo, w pobliżu którego została znaleziona (znalazca donosił, że okaz miał zapach żywicy). Po przeciwnej stronie okazu były widoczne wciśnięte w skorupę obtopieniową pozostałości roślinne<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Istnieją podejrzenia, że okaz mógł szybować podczas spadku ze względu na swój aerodynamiczny kształt, jakkolwiek autorzy obliczeń (Shrbený i in., 2022) uważają, iż nie ma to znaczenia dla ewentualnych dalszych znalezisk, gdyż każdy meteoryt może mieć inną formę, a w tym konkretnym przypadku pozycja znaleziska zgadza się z przewidywaną w granicach niepewności, które są większe od tych wynikających z różnic kształtu.

<sup>6</sup> Fragmenty roślinne z całą pewnością przywarły do meteorytu podczas uderzenia w grunt. Wynika z tego, że okaz po otarciu o drzewo wylądował w trawie i rykoszetem potoczył na drogę (Bingoraj, 2021 informacja prywatna). Taki scenariusz wskazuje na dużą energię kinetyczną i może tłumaczyć brak innych okazów w okolicy, które prawdopodobnie podczas bezpośrednich impaktów zagłębiły się w ziemię.



**Ryc. 1. A** – zdjęcia ukazujące przelot bolidu EN150721 (Mikstat/Antonin) zapisane przez kamery stacji Europejskiej Sieni Bolidowej; **B** – obliczony prawdopodobny obszar spadku fragmentów meteorytów. Czerwony symbol – lokalizacja znalezionej, 350-gramowej fragmentu meteorytu Antonin. Jak widać, masa odnalezionej fragmentu idealnie odpowiada przewidywaniom dotyczącym fragmentacji (Shrbený i in., 2022)

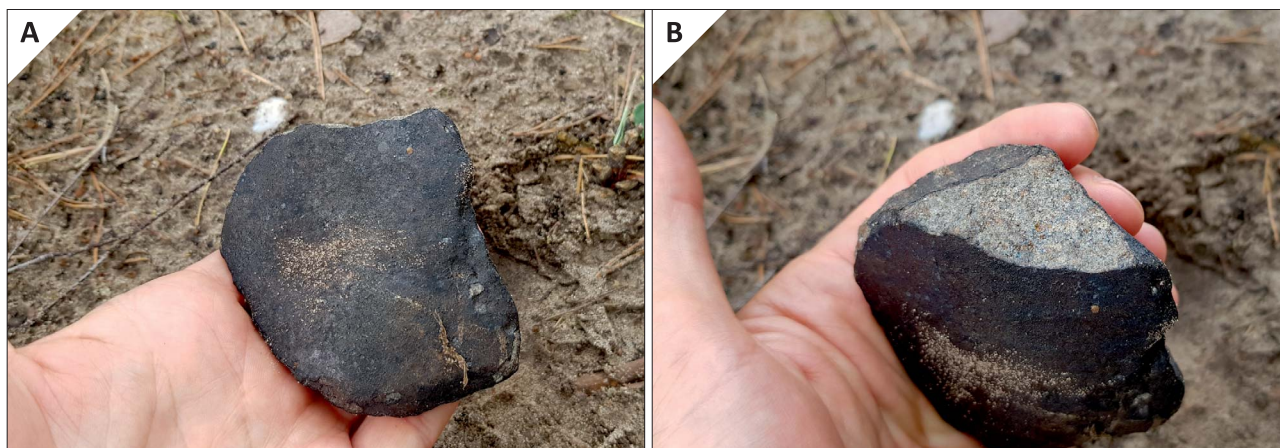
**Fig. 1. A** – photographs of bolide EN150721 (Mikstat/Antonin) recorded by the European Meteor Network; **B** – reconstructed meteorite strewnfield area. Mass of the found specimen exactly fits the predictions coming from fragmentation modelling (Shrbený et al., 2022)

### Badania zawartości izotopów kosmogenicznych – potwierdzenie połączenia znalezionej fragmentu z obserwacją bolidu

Meteoryt był znaleziony podczas wyprawy prywatnej, stąd też udokumentowanie połączenia znaleziska z bolidem wymagało zebrania naukowych dowodów. Znanych jest bowiem kilka przypadków, w których rzekomi znalazcy przynosili fragment meteorytu, który później okazał się być np. spadkiem innego meteorytu lub znaleziskiem pustynnym, niemającym nic wspólnego z obszarem spad-

ku (np. meteoryt pierwotnie przedstawiany jako Rusalka k. Poznania, który okazał się być spadkiem pustynnym (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=70617>). Aby wykluczyć taką sytuację w przypadku Antonina, odnaleziony fragment został poddany badaniom radionuklidów kosmogenicznych, które pozwalają na oszacowanie czasu spadku meteorytu (Tymiński i in., 2023a).

Dzięki świadomości poszukiwaczy, znaleziony okaz bardzo szybko trafił do Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Otwocku-Świerku, gdzie metodami nieniszczącymi zmierzone zostały aktywności izotopów  $\gamma$ -promieniotwó-



**Ryc. 2.** Odnaleziony 350-gramowy fragment meteorytu Antonin. Fot. K. Kmieciak  
**Fig. 2.** The recovered 350 g in mass, specimen of the Antonin meteorite. Photo by K. Kmieciak

rczych w kompletnym okazie meteorytu. Badania wykryły obecność dwunastu radionuklidów ( $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{48}\text{V}$  i  $^{51}\text{Cr}$ ), które powstają wskutek interakcji skał z cząsteczkami promieniowania kosmicznego, a zatem są wskaźnikami pozaziemskiego pochodzenia skały (Spergel i in., 1986). Co istotne jednak, wiele z nich to izotopy krótkożyciowe, a zatem są one obecne w meteorycie tylko przez krótki czas po spadku na Ziemię. W przypadku badania meteorytu Antonin, obecność  $^{48}\text{V}$ ,  $^{51}\text{Cr}$  oraz  $^7\text{Be}$ , których czas połowicznego rozpadu wynosi odpowiednio 16, 28 i 53 dni, jednoznacznie potwierdziła, że znaleziony fragment jest świeżym spadkiem, który można z całą pewnością łączyć z obserwacją bolidu. Wyniki tych analiz zostały opublikowane w zbiorczym artykule naukowym dotyczącym meteorytu Antonin (Shrbený i in., 2022) oraz przedstawione bardziej szczegółowo w pracy Tymińskiego i in. (2023b).

#### CHARAKTERYSTYKA PETROGRAFICZNA ORAZ KLASYFIKACJA METEORYTU

Z fragmentu meteorytu odcięty został materiał potrzebny do klasyfikacji i rejestracji. Depozyt naukowy w postaci dwóch płytek o masie 20,8 g, konieczny do rejestracji meteorytu, został umieszczony w Muzeum Ziemi Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Masa główna znalezionej meteorytu pozostaje własnością znalazcy. Z fragmentu wykonano także płytkę cienką do badań i klasyfikacji. Rejestracja Antonina została zaakceptowana przez Meteoritical Society w maju 2022 r., a opis dostarczony w procesie klasyfikacji opublikowany w *Meteoritical Bulletin Database* nr 111 (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=77489>).

Fragment przeznaczony do klasyfikacji przekazano w postaci cienkiego plastra, z którego została wykonana płytkę cienką. Płytkę poddano obserwacji mikroskopowej w świetle przechodzącym i odbitym oraz bardziej szczegółowym obserwacjom SEM (mikroskopia skaningowa, *Scanning Electron Microscopy*) i analizie EPMA (mikrosonda elektronowa, *Electron Probe MicroAnalysis*). Analizy zostały wykonane na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu w Oslo przy użyciu mikroskopu skaningowego Hitachi SU5000 FEG-SEM wyposażonego w detektor EDX Dual Bruker Quanta Xflash30 oraz instrumentu Cameca SX-100. Obrazy SEM zebrano z użyciem wiązki elektronicznej o napięciu przyspieszającym 15 kV, natomiast warunki analityczne podczas analiz EPMA to 15 kV napięcia

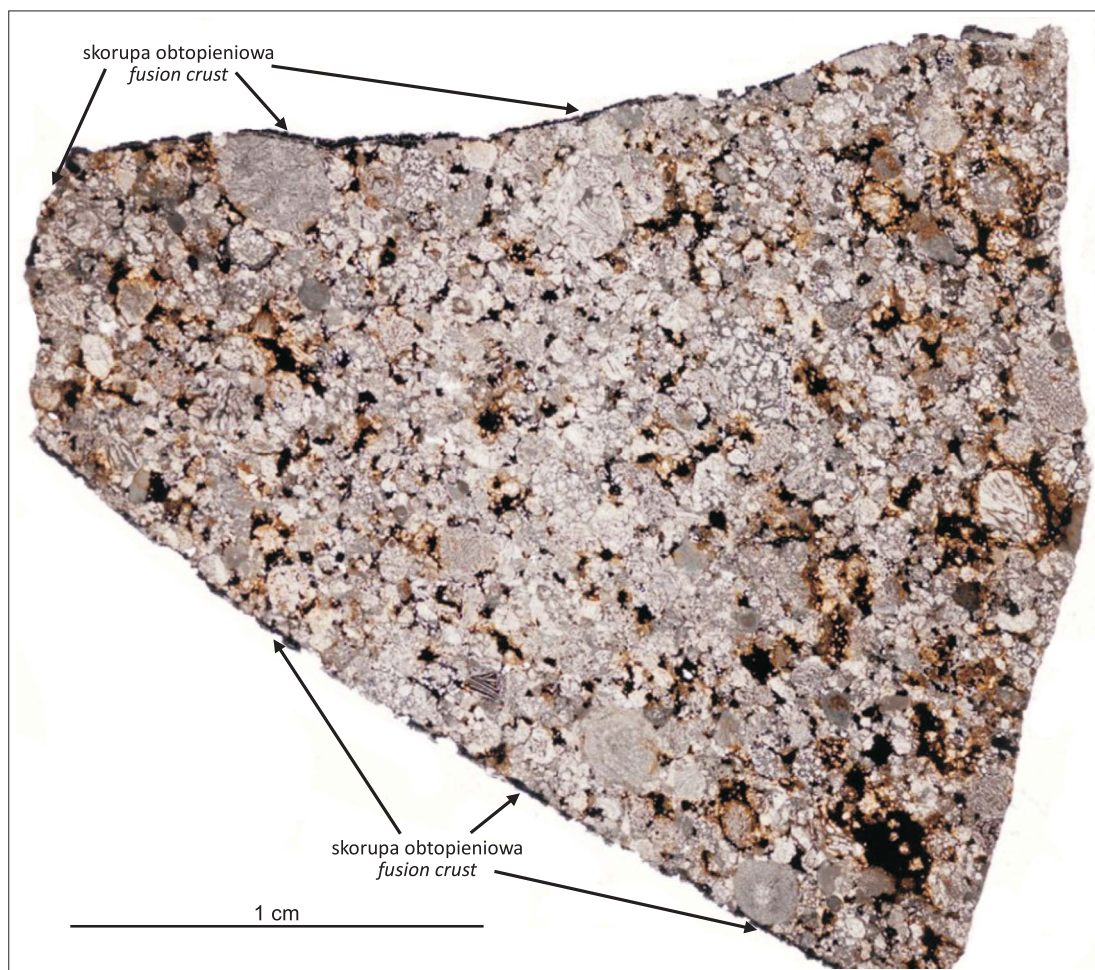
przyspieszającego i 20 nA natężenia wiązki. Analizy były wykonane przy skupionej wiązce. Do badań pierwiastków głównych oraz wybranych pierwiastków pobocznych zastosowano czas zliczania pików 10–20 s. Podczas badań Co i Cu w stopach żelazo-niklu wydłużono czas zliczania do 40 s. Użyte były standardy naturalne i syntetyczne typowe dla pracy z Cameca SX-100. Aby wyeliminować wpływ nakładania się pików poszczególnych pierwiastków w spektrum WDS, zastosowano korekcję PAP (Pouchou, Pichoir, 1991) oraz, dla faz żelazo-niklowych, dodatkową korekcję nakładających się pików Fe-K $\beta$  i Co-K $\alpha$ . Fosforany były analizowane dwustopniowo: wiązka 10 kV i 8 nA użyta była do analizy Na, Cl and F, a wyniki były zintegrowane z analizą P, Mg, Ca, K, Fe i Mn wykonanej przy użyciu wiązki 15 kV i 15 nA.

Klasyfikacja meteorytu wymagała określenia grupy chemicznej oraz tzw. typu petrologicznego, czyli stopnia krystaliczności materiału i składu chemicznego minerałów (wg schematu VanSchmussa, Wooda, 1967) oraz stopnia deformacji uderzeniowej (wg schematu Stöfflera i in., 1991). Już na podstawie charakterystyki skorupy obtopieniowej, a także struktury skały odsłoniętej w odprysnięciach skorupy (ryc. 2B), można było wnioskować, że Antonin jest chondrytem zwyczajnym, prawdopodobnie zrównoważonym (Krzesińska, 2023).

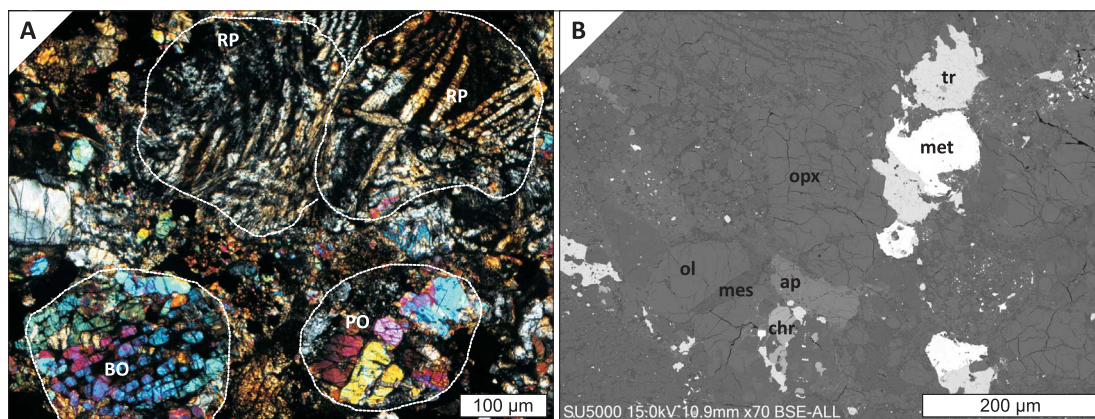
Standardowo klasyfikacja meteorytów obejmuje także określenie stopnia zwietrzenia. W przypadku Antonina, który był podjęty szybko po spadku, stopień zwietrzenia wynosi W0.

Zarówno na odsłoniętych powierzchniach wewnętrznych meteorytu w miejscach odprysnięcia skorupki obtopieniowej (ryc. 2), jak i na przeciętych powierzchniach meteorytu ukazuje się wyraźnie chondrytowa struktura skały z wieloma ziarnami żelazo-niklu oraz kilkoma zachowanymi chondrami.

W obrazie mikroskopowym w płytce cienkiej dominującymi minerałami są oliwin, niskowapniowy piroksen, żelazonikiel i troilit. Akcesorycznie występują też chromit, ilmenit, oraz fosforany: merrillit i Cl-apatyt, o rozmiarach sięgających nawet 500  $\mu\text{m}$ . Meteoryt ma krystaliczną strukturę, ze śladami dość zaawansowanej rekrystalizacji (ryc. 3). W wielu miejscach zachowane jest jednak szkliste lub drobnokrystaliczne mezostasis chondr, a rzadki jest krystaliczny plagioklaz i – jeśli obecny – ziarna mają rozmiar poniżej 50  $\mu\text{m}$  (ryc. 4). Mezostasis jest zbudowane z mikrokrystalitów diopsydu i skaleniowego szkliwa.



**Ryc. 3.** Płytkę cienką wykonaną z meteorytu Antonin w obrazie mikroskopowym, w świetle przechodzącym. Widoczne są zachowane nieliczne chondry, a także ziarna metalu oraz skorupa obtepieniowa. Fot. S. Simonsen  
**Fig. 3.** Thin section of the Antonin meteorite under plane-polarized optical light. Individual retained chondrules, metal grains and a fusion crust are seen. Photo by S. Simonsen



**Ryc. 4.** Struktura meteorytu Antonin. **A** – chondry w obrazie mikroskopowym: chondra belkowa oliwinowa (BO) w centrum obrazu oraz chondry profirowa oliwinowa (PO) i radialna piroksenowa (RP); **B** – obraz BSE z widocznymi minerałami głównymi i pomocznymi, a także zachowanym szkliwem plagioklazowym. Ol – oliwin, opx – niskowapniowy piroksen, ap – apatyt, chr – chromit, tr – troilit, met – minerały żelazo-niklu: kamacyt i taenit  
**Fig. 4.** Texture of the Antonin meteorite. **A** – optical microscopy image of chondrules: barred olivine (BO) chondrule in the image centre and porphyritic olivine (PO) and radial pyroxene (RP) chondrules; **B** – BSE image, main and minor minerals are visible. Ol – olivine, opx – low-Ca pyroxene, ap – apatite, chr – chromite, tr – troilite, met – iron-nickel phases: kamacite and taenite

Chemicznie meteoryt Antonin wykazuje niemal pełny stopień zrównoważenia wyrażony homogenicznym składem krzemianów: oliwinu i ortopiroksenu. Pomierzone

skład chemiczny oliwinu i niskowapniowego piroksenu wskazują na niewielkie odchylenia zawartości Fe oraz Mg zarówno wewnątrz ziaren (brak zonalności, ryc. 4), jak

Tab. 1. Skład chemiczny minerałów meteorytu Antonin wyznaczony przez pomiar mikrosondą elektronową  
Table 1. Chemical composition of minerals in Antonin meteorite as measured with EPMA

Mineral Mineral	Wzór chemiczny Chemical formula	Skład molowy Molar composition
Oliwin / Olivine	(Fe <sub>0,48-0,50</sub> Mg <sub>1,47-1,51</sub> Mn <sub>0,01</sub> )(Si <sub>10,99-1,00</sub> O <sub>4</sub> )	23,9–25,1 mol% Fa
Ortopiroksen / Low-Ca pyroxene	(Fe <sub>0,40-0,43</sub> Mg <sub>1,51-1,55</sub> Mn <sub>0,01-0,02</sub> Ca <sub>0,01-0,04</sub> )(Si <sub>1,99-2,01</sub> Al <sub>0,00-0,02</sub> O <sub>6</sub> )	20,4–21,9 mol% Fs, 0,69–2,00 mol% Wo
Plagioklaz / Plagioclase	(Na <sub>0,85-0,89</sub> K <sub>0,05-0,08</sub> Ca <sub>0,07-0,09</sub> )(Al <sub>1,04-1,07</sub> Si <sub>2,88-2,94</sub> O <sub>8</sub> )	6,9–8,9 mol% An, 5,3–7,9 mol% Or
Szklivo chondr / Chondrule mesostasis glass	(Fe <sub>0,13-0,21</sub> Mg <sub>0,81-1,00</sub> Mn <sub>0,01</sub> Ca <sub>0,67-0,83</sub> Na <sub>0,03-0,09</sub> Al <sub>0,02-0,07</sub> )(Si <sub>1,97-2,00</sub> Al <sub>0,01</sub> Ti <sub>0,01</sub> Cr <sub>0,01-0,02</sub> O <sub>6</sub> )	7,25–11,64 mol% Fs, 44,75–45,28 mol% Wo
Kamacyt / Kamacite	Fe <sub>0,92-0,93</sub> Ni <sub>0,06-0,07</sub> Co <sub>0,01</sub>	
Taenit / Taenite	Fe <sub>0,63-0,69</sub> Ni <sub>0,29-0,37</sub> Co <sub>0,001-0,004</sub> Cu <sub>0,011-0,012</sub>	
Merrillit / Merrillite	(Ca <sub>18,35-18,70</sub> Na <sub>1,81-2,03</sub> Mg <sub>1,86-2,04</sub> Fe <sub>0,11-0,25</sub> )(P <sub>1,03-1,04</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>14</sub>	
Apatyt / Apatite	(Ca <sub>8,84-4,91</sub> Mg <sub>0,01</sub> Fe <sub>0,01-0,04</sub> Na <sub>0,06-0,08</sub> )(P <sub>1,00-1,01</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (Cl <sub>0,64-0,74</sub> F <sub>0,13-0,21</sub> O <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) <sub>0,47-0,52</sub>	
Chromit / Chromite	(Fe <sub>2+</sub> <sup>6,61-6,86</sup> Mg <sub>0,86-1,10</sub> Zn <sub>0,05-0,09</sub> Mn <sub>0,18-0,20</sub> )(Cr <sub>12,90-13,25</sub> Al <sub>1,90-2,15</sub> V <sub>0,14-0,19</sub> Ti <sub>0,28-0,54</sub> Fe <sub>3+</sub> <sup>-0,05</sup> )O <sub>31,90-32,11</sub>	Fe# = 0,86–0,89, Cr# = 0,81–0,87
Ilmenit / Ilmenite	(Fe <sub>0,81-0,82</sub> Mg <sub>0,12-0,13</sub> Mn <sub>0,02-0,03</sub> )Ti <sub>1,00</sub> O <sub>3</sub>	10,4–13,3 mol% Geik, 3,0–3,2 mol% Pnt
Troilit / Troilite	Fe <sub>0,96-0,99</sub> Ni <sub>0,02</sub> S <sub>1</sub>	
Pentlandyt / Pentlandite	Fe <sub>0,81-0,95</sub> Ni <sub>0,09-0,27</sub> S <sub>1</sub>	

Fa – fajalit / fayalite, Fs – ferrosilit / ferrosilite, Wo – wollastonit / wollastonite, An – anortyt / anorthite, Or – ortoklaz / orthoclase, Geik – Geikilit / geikielite, Pnt – Pirofomit / pyrophanite

i pomiędzy poszczególnymi ziarnami. W tabeli 1 przedstawiono zbiorcze wyniki składu chemicznego wszystkich minerałów występujących w meteorycie Antonin.

Zrównoważenie składu minerałów głównych Antonina pozwala na klasyfikację chemiczną przy użyciu prostej korelacji zawartości Fe w krzemianach i Co w kamacycie. Wyniki średnich analiz oliwiny i piroksenu plasują meteoryt Antonin w środku zakresu typowego dla chondrytów L, podobnie jak korelacja składu oliwiny i kamacytu (ryc. 5).

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 petrograficznego 5, z uwagi na silne zrównoważenie składu krzemianów – oliwiny i piroksenu (Krzysińska, 2023). Jednak pewne cechy teksturalne, takie jak drobny rozmiar ziarna plagioklazu (pomimo zrównoważonego składu) i obecność zachowanych gdzieniegdzie chondr, sugerują lokalną niedojrzałość teksturalną materiału (zgodnie z kryteriami klasyfikacyjnymi schematu Van Schmus i Wooda, 1967). Na przekrojach meteorytu Antonin, badanych przez Bischoffa i in. (2022) niedojrzałość teksturalna jest widoczna nawet bardziej niż w próbce analizowanej przez nasz zespół i powyżsi autorzy skłaniają się do sklasyfikowania meteorytu Antonin jako typ petrologiczny 4. Ta różnica interpretacji jest omówiona poniżej ponieważ prawdopodobnie wskazuje na interesującą cechę meteorytu w zakresie jego historii deformacyjnej.

Szczegółowa charakterystyka petrograficzna i mineralogiczna meteorytu wykonana w celach klasyfikacji jest przedstawiona w publikacji łączącej meteoryt z obserwacją bolidu (Shrbený i in., 2022). Także praca Bischoffa i in. (2022) prezentuje obserwacje własne tych autorów zebrane podczas wypraw poszukiwawczych w obszar spadku meteorytu Antonin oraz późniejsze analizy wykonane na udostępnionym przez znalazcę fragmencie. Ponadto szczegółowy raport analiz EPMA oraz dokumentacja mikroskopowa płytki meteorytu są dostępne w pracy Krzysińskiej (2023).

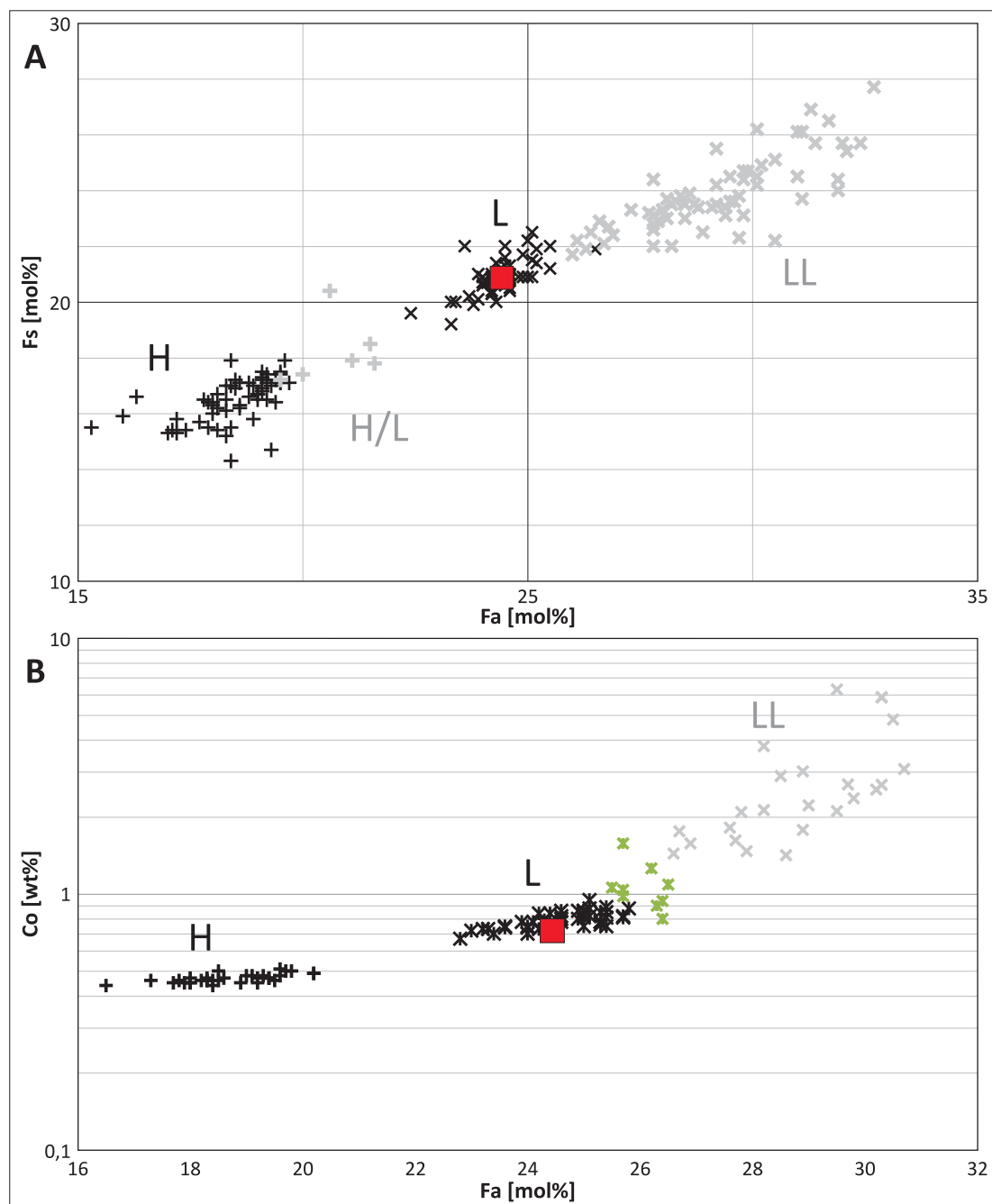
Rozkład deformacji ziaren oliwiny (ocenione wg kryteriów klasyfikacyjnych zaproponowanych przez Stofflera i in., 1991), szczegółowo przedstawiony w pracy Krzysińskiej (2023), pozwala zaklasyfikować meteoryt Antonin jako zdeformowany w stopniu S3. Antonin jest zdeformowany heterogenicznie, co jest typowe dla procesu uderzeniowego. W płycie cieniowej widać wiele struktur sugerujących lokalne topienie uderzeniowe wskutek kumulacji fali uderzeniowej na kontaktach faz o różnej gęstości, są to w szczególności kieszenie stopowe, zbudowane ze szkliwa skaleniowego i globulek metalu i siarczków. Obecne są także agregaty chromitowo-plagioklazowe (ryc. 6), które powstają wskutek korodowania chromitu przez stop plagioklazowy powstały podczas procesu szokowego (Rubin, 2004).

## DISKUSJA NAD KLASYFIKACJĄ I WALORAMI NAUKOWYMI METEORYTU ANTONIN

### Ewolucja skały na ciele macierzystym

Charakterystyka meteorytu Antonin wykonana do celów klasyfikacji jednocześnie wskazuje na jego cechy, które nieznacznie wykraczają poza ramy klasyfikacyjne.

1. Antonin jest zrównoważonym chondrytem zwyczajnym. Jego skład chemiczny, a także charakterystyka



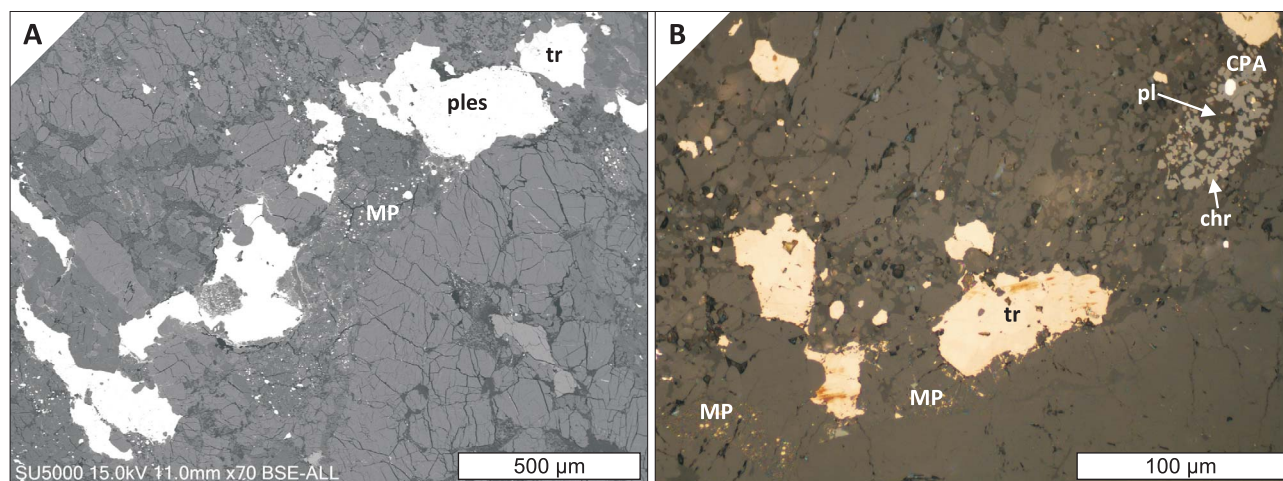
**Ryc. 5.** Klasyfikacja chemiczna Antonina na podstawie składu (zrównoważonego) oliwiny, niskowapniowego piroksenu i kamacytu (niskonikłowy stop rodzimy FeNi) (Shrbený i in., 2022; Krześcińska, 2023). **A** – zawartość fajalitu w oliwinie (Fa mol%) i ferrosylitu w piroksenie (Fs mol%) umiejscawiają 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, Jones (1998)

**Fig. 5.** Chemical group classification of Antonin based on the olivine, low-Ca pyroxene and kamacite composition (Shrbený et al., 2022; Krześcińska, 2023). **A** – fayalite content in olivine (Fa mol%) and ferrosilite content in pyroxene (Fs mol%) plot in the field of L chondrites; **B** – content of Co in kamacite corresponds to the values of average Fe content in silicates of L chondrites. Literature data for H, L, LL and L/LL chondrites: Rubin (1990); Brearley, Jones (1998)

izotopowa (Bischoff i in., 2022; Shrbený i in., 2022; Krześcińska, 2023) sugerują, że jest typowym chondrytem L.

- Antonin jest meteorytem dość nietypowym teksturalnie, szczególnie biorąc pod uwagę brak zgodności pomiędzy zrównoważeniem tekstury i składu chemicznego. Teksturalnie wykazuje on wiele cech meteorytu, który przeszedł minimalną obróbkę termicz-

ną. Chemicznie jest jednak bardzo jednorodny, co sugeruje zaawansowany proces równoważenia wskutek działania podwyższonych temperatur. Patrząc na deformację uderzeniową meteorytu Antonin, można wnioskować, że ta pozorna niezgodność może mieć swoje źródło w sprzężeniu procesów termicznych (opisanych w klasyfikacji przez typ petrograficzny 4 lub 5) z procesami szokowymi (Krześcińska, 2023).



**Ryc. 6.** Struktury szokowe w meteorycie Antonin. **A** – kieszeń stopowa (MP), zbudowana z mikrometrowych rozmiarów sferulek metaliczno-siarczkowych, szokowego szkliwa krzemianowego i ziaren oliwiny, oraz sąsiadujący z kieszenią agregat plessytowych przerostów kamacytu i taenitu (ples); obraz BSE; **B** – agregat chromitowo-plagioklazowy (CPA), obraz mikroskopowy w świetle odbitym. Więcej do znalezienia w pracy Krześcińskiej (2023) i Shrbený i in. (2022). tr – troilit, chr – chromit, pl – plagioklaz

**Fig. 6.** Shock features in the Antonin meteorite. **A** – melt pocket (MP), containing micrometr-sized metal-sulfide spherules, silicate shock glass and olivine grains, and plessite assemblage at the contact with the melt pocket; BSE image; **B** – chromite-plagioclase assemblage (CPA), microphotograph in reflected light. More shown in Krześcińska (2023) and Shrbený et al. (2022). tr – troilite, chr – chromite, pl – plagioclase

Procesy uderzeniowe na ciałach macierzystych chondrytów prowadzą do lokalnego wzrostu temperatur oraz gwałtownego termicznego równoważenia po ustąpieniu fazy uderzeniowej kompresji. Przebiegają one w sposób gwałtowny, nierównowagowy i heterogeniczny. Dlatego możliwe jest, że w Antoninie lokalne i heterogeniczne zrównoważenie składu minerałów mogło nastąpić wskutek procesu uderzeniowego, a nie statycznego, równowagowego procesu akrecyjnego (Ruzicka i in., 2015).

#### Unikatowość meteorytu Antonin – rekonstrukcja orbity heliocentrycznej

Jednym z najważniejszych aspektów, które czynią meteoryt Antonin cennym materiałem naukowym jest zapis jego spadku z kamer bolidowych (Shrbený i in., 2022), dzięki któremu została dokonana rekonstrukcja heliocentrycznej orbity meteoroidu. Orbita ta nie jest typowa i wskazuje na złożoną historię ciała macierzystego, które najprawdopodobniej w sposób katastroficzny zostało (tj. wskutek zderzeń z innymi ciałami) przetransportowane z pierwotnej lokalizacji w Pasie Planetoid do wnętrza Układu Słonecznego. Z charakterystyki petrograficznej zarysowanej w tej pracy i przedstawionej bardziej szczegółowo w innych pracach (Shrbený i in., 2022; Krześcińska, 2023) wynika, że historia termiczna i kolizyjna meteorytu Antonin może wnieść wartościowe informacje o dynamice małych ciał Układu Słonecznego. Możliwość połączenia ich z potencjalnym obszarem źródłowym w Pasie Planetoid może oddać naturę oddać naturę planetoid.

Obserwacja bolidu czyni meteoryt Antonin materiałem unikatowym w skali świata, bo na ten moment istnieje zaledwie ok. 50 meteorytów w kolekcjach światowych, dla których znamy parametry orbitalne ich ciał macierzystych. Oczywiście przy ilości obecnie działających sieci bolidowych i w świetle ich ciągłego rozwoju liczba znajdowanych meteorytów rośnie z roku na rok (np. Shrbený i in., 2020; Borovička i in., 2022). Mamy nadzieję, że będzie rosła także w Polsce. Z naszego doświadczenia nabranego

podczas pracy nad rejestracją Antonina widać, że potrzebne są działania edukacyjne i inwestycyjne, aby w Polsce odnajdowanie meteorytów spadkowych dorównało poziomowi światowemu.

#### WNIOSKI WYNIESIONE Z PRACY NAD REJESTRACJĄ I KLASYFIKACJĄ METEORYTU ANTONIN

Spadek meteorytu Antonin został zaobserwowany przez kamery czeskiej sieci bolidowej, natomiast nie był widziany przez naocznych obserwatorów. Masa 350 g i spadek w godzinach wczesno-porannych sprawiają, że trudno oczekiwać, aby zostało to zaobserwowane przez miejscową ludność. Patrząc na statystyki podnoszenia chondrytów niespadkowych w Polsce (dyskusja poniżej), z ogromnym prawdopodobieństwem można przypuszczać, że nie zostałaby on podjęty, gdyby nie fakt obserwacji bolidu i następującej po tym dedykowanej wyprawy poszukiwawczej. Pokazuje to jak pozytywne skutki może przynieść inwestycja w sieci bolidowe, w tym działającą w Polsce od wielu lat Polską Sieć Bolidowa PFN (Wiśniewski i in., 2017; Tymiński i in., 2019, 2021).

Odnalezienie fragmentu Antonina pokazuje, że sukces zależy w dużej mierze od jakości wypraw poszukiwawczych oraz przeszkolenia poszukiwaczy. Konieczna jest jednak wiedza i świadomość ogółu społeczeństwa kraju, a nie tylko poszukiwaczy profesjonalistów.

Zgodnie z polskim prawem meteoryt pozostaje własnością znalazcy. Fakt odnalezienia meteorytu Antonin przez osobę prywatną poskutkowało tym, że masa główna pozostaje w rękach prywatnych, a depozyt naukowy to jedynie 21 gramów materiału (minimum wymagane do klasyfikacji), a nie cały fragment, jakby miało to miejsce w przypadku ekspedycji naukowej z udziałem wolontariuszy. Dodatkowo fragmenty meteorytu były rozdyskrebowane poza granice Polski jeszcze przed jego oficjalną klasyfikacją, uniemożliwiając zbudowanie polskiego konsorcjum naukowego dedykowanego całościowej analizie meteorytu.



Sytuacja taka była możliwa wyłącznie dlatego, że meteoryt pozostawał własnością prywatną.

Na świecie powstają i funkcjonują programy edukacyjne zwiększające zaangażowanie lokalnych społeczności w inicjatywy poszukiwania meteorytów, szczególnie tych zaobserwowanych przez sieci bolidowe. Być może przydałyby się w Polsce inicjatywy edukacyjne („jak rozpoznać meteoryt”) oraz programy umożliwiające regularne wyprawy poszukiwawcze, a także wspierające współpracę środowisk naukowych z lokalnymi społecznościami obywateli. Działania takie poskutkowałyby zapewne tym, że przyszłe spadki meteorytów pozostawałyby w krajowych kolekcjach muzealnych, dostępne dla obywateli i do szczegółowych badań naukowych.

### PRZEGLĄD KOLEKCJI POLSKICH METEORYTÓW I PROPOZYCJA DZIAŁAŃ ZMIERZAJĄCYCH DO JEJ WZBOGACENIA

Meteoryt Antonin to 26. oficjalnie zarejestrowany polski meteoryt (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=77489>). Trzy z tych meteorytów znane są wyłącznie z artefaktów, znalezionych podczas prac archeologicznych (Pokrzywnicki, 1964; Kotowiecki, 2010), a jeden reprezentowany jest jedynie przez unikatowe, kopalne relikty wydobyte z odsłonięcia w okolicach Lechówki (Szopa i in., 2017a, b). Dla 22 meteorytów zostały opisane okoliczności spadku czy odnalezienia, jednak do czasów obecnych zachowało się niestety tylko 20 z nich. Dla dwóch (Ratyń i Żagań) istnieją wyłącznie zapisy historyczne o spadku. Oba okazy (Ratyń i Żagań) zaginęły i nie jest nawet znany rodzaj materiału, jaki reprezentowały<sup>7</sup> (Pokrzywnicki, 1964; Pilski, 1992, 2001).

Biorąc pod uwagę możliwą roczną ilość 17 tys. spadków meteorytów w skali globu (Evatt i in., 2020), na teren Polski spadać może ok. 10 meteorytów rocznie. Nawet jeśli większość z nich ma rozmiary zbyt małe, by być zauważona (zazwyczaj dla odnalezienia potrzeba fragmentu o masie przynajmniej 50 g), liczba wyraźnie kontrastuje z rzeczywistością odnalezionymi meteorytami (20 meteorytów w przeciągu ponad 200 lat) i pokazuje, że spora część materiału meteorytowego w Polsce ulega przeoczeniu. Poniżej przedstawiono analizę kolekcji polskich meteorytów, na podstawie której można wnioskować o przyczynach takiego stanu.

W analizie pod uwagę wzięto 20 meteorytów, których spadek lub odnalezienie miały miejsce we współczesnych czasach (wyłączone z analizy są meteoryty kopalne oraz artefakty). Proporcja obserwowanych spadków i znalezisk w skali Polski jest porównana do proporcji w skali światowej oraz porównane są statystyki dotyczące typu podnoszonego materiału meteorytowego.

Wśród 20 polskich meteorytów jest: 12 chondrytów, 5 meteorytów żelaznych, 2 achondryty i 1 meteoryt żelazno-kamienny. Chondryty zwyczajne to najczęstszy typ meteorytów docierających do Ziemi a także najczęstszy typ chondrytu w kolekcji polskiej (ryc. 7). Oprócz Antonina do chondrytów zwyczajnych typu L należą: Baszkówka (spadek w 1994 r., Krześcińska, Almeida, 2019; Borucki, Stepniowski, 2001; Siemiątkowski, 2001; Przylibski i in., 2003), Sołtmany (spadek w 2011 r., Karwowski, 2012;

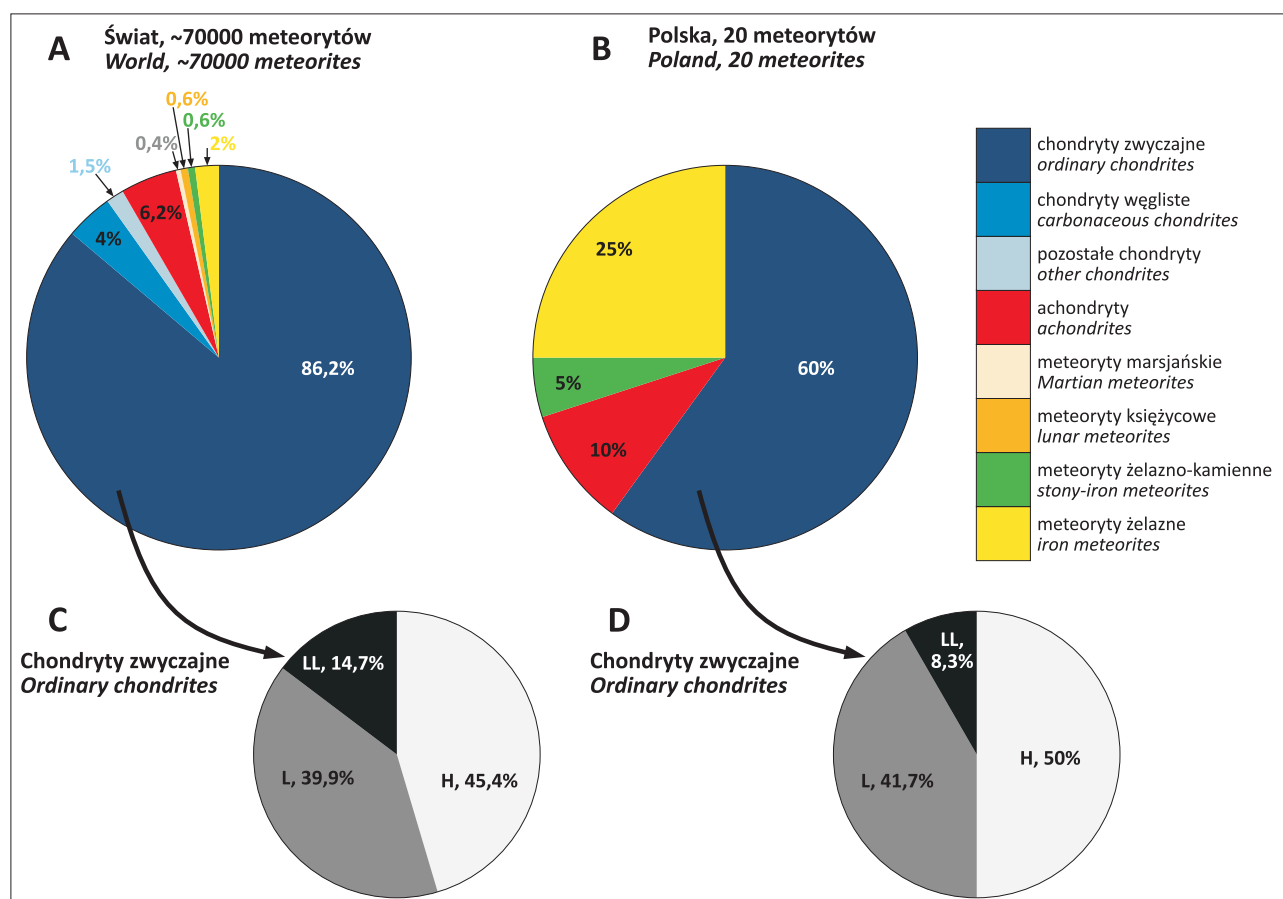
Woźniak, Woźniak, 2012), Skalin (spadek w 1715 r., Pokrzywnicki, 1964) i Świecany (znaleziony w 2004 r., Karwowski i in., 2009). Obok chondrytów L częstym typem meteorytów są chondryty H, takie jak Pułtusk (spadek w 1868 r., Babczyński i in., 1868; Samsonowicz, 1952; Manecki, 1972; Krześcińska i in., 2015; Krześcińska, 2016; Krześcińska, 2017), Piława Górna (1879), Wilkanówko (1841) i Grzemy (1910) oraz znaleziska Kuźnica (2008; Karwowski i in., 2021) i Podgrodzie (2000). W kolekcji polskiej zachowany jest też jeden chondryt LL – Leoncin, który jest prawdopodobnym spadkiem z roku 2017, jednak okoliczności spadku nie są w pełni udokumentowane (Karwowski, Szopa, 2020). Choć proporcja polskich chondrytów wśród meteorytów jest nieco mniejsza niż statystyczna światowa (60% w Polsce i ~90% na świecie), to rozkład poszczególnych typów (H, L i LL) jest niemal identyczny (ryc. 7C–D).

W kolekcji polskiej jest też zachowane 5 meteorytów żelaznych, wszystkie są znaleziskami (Pokrzywnicki, 1964; Pilski i in., 2013; Woźniak, 2021). Są to meteoryty: Krządka (1929), Morasko (1914), Świecie (1850), Przelazy (1847) i Tartak (2012). Kolekcja polska zawiera także 2 achondryty: niezgrupowany achondryt enstatytowy Zakłodzie (znaleziony w 1998 r., Przylibski i in., 2005; Krześcińska i in., 2019) oraz eukryt Białystok (spadek w 1827 r., Pokrzywnicki, 1964), a także mezosyderyt (meteoryt kamiennie-żelazny) Łowicz (spadek w 1935 r., Różycki, Kobyłecki, 1935; Kobyłecki, 1938; Pokrzywnicki, 1964). Nie mamy w Polsce chondrytu węglistego, choć – z czysto statystycznego punktu widzenia – mieć powinniśmy. Chondryty węgliste stanowią 4% materiału meteorytowego w skali świata, a zatem statystycznie mógłby być zachowany jeden taki chondryt w zbiorze 20 meteorytów polskich (ryc. 7A–B). Spadki materiału węglistego prawdopodobnie miały miejsce, jeśli polegać na zapisach sieci bolidowych (np. bolid nad Głogowem w styczniu 2020 r., Tymiński i in., 2021; czy bolid PF310515 pod Stanisławowem, Tymiński i in., 2019), niestety nie zostały odnalezione.

W kolekcjach światowych, zgodnie z bazą danych *Meteoritical Bulletin*, jest zachowanych 70 tys. meteorytów. Zaledwie 4% tej liczby to spadki i znaleziska meteorytowe z obszarów zamieszkałych (ryc. 8A; zdecydowana większość meteorytów pochodzi z dedykowanych wypraw na Antarktydę oraz gorące pustynie, w naszych rozważaniach te znaleziska będą pominięte). Porównując kolekcję polską ze światową, z wyłączeniem gorących i ziemnych pustyni, można zauważyć następujące fakty:

1. W Polsce mamy zdecydowanie mniej znalezisk niepowiązanych z obserwacją spadku niż ma to miejsce w skali świata (ryc. 8B–C), gdzie 64% meteorytów z obszarów zamieszkałych to znaleziska, podczas gdy w Polsce jest to zaledwie 45%. Ta nadreprezentatywność spadków wynika do pewnego stopnia z gęstości zaludnienia w Polsce, wystarczającej do tego, aby potencjalny bolid był zaobserwowany już w chwili przelotu, a materiał meteorytowy podjęty krótko potem. Patrząc jednak na lokalizację zaobserwowanych spadków i brak korelacji z rozkładem gęstości zaludnienia (ryc. 9), a także biorąc pod uwagę fakt, że wiele bolidów pozostaje niezauważonych,

<sup>7</sup> Z opisu meteorytu Ratyń możemy jedynie domniemywać, iż stanowił on materiał achondrytowy.



**Ryc. 7.** Statystyki dotyczące kolekcji meteoroidów w Polsce na tle statystyk w skali światowej. **A–B** – proporcje meteoroidów wg typu materiału: **A** – na świecie, **B** – w Polsce; **C–D** – rozkład grup H, L i LL wśród chondrytów zwyczajnych. Pomimo nieznacznie niższej liczby chondrytów zwyczajnych w Polsce niż ma to miejsce w skali globalnej, odsetek poszczególnych typów chondrytów zwyczajnych (H, L, LL) jest niemal identyczny jak statystyki w skali światowej. Źródło informacji dotyczącej meteoroidów w skali światowej: *Meteoritical Bulletin* oraz Grady (2000)

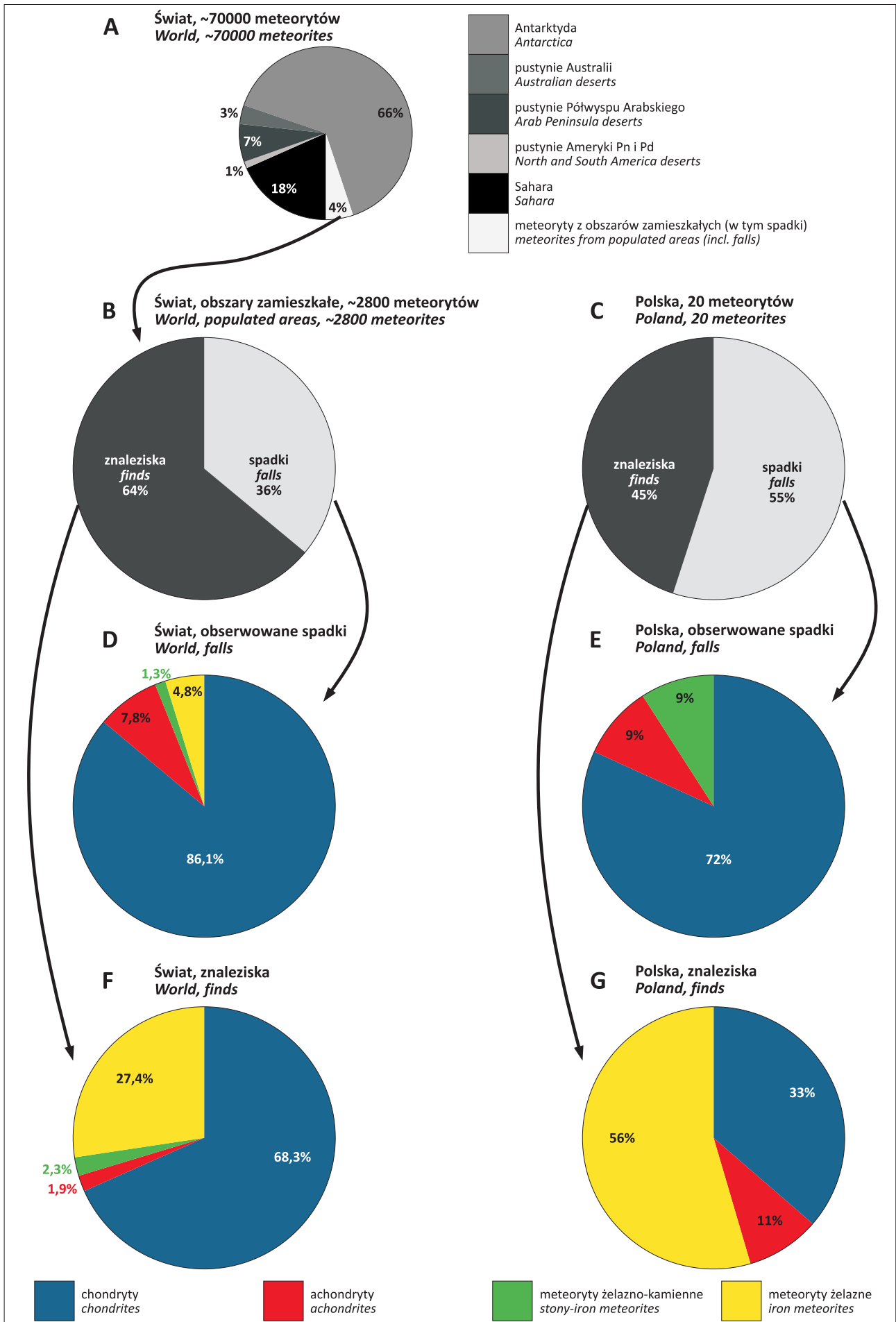
**Fig. 7.** Polish meteorite collection compared statistically to global collection. **A–B** – amount of various meteoritic types: **A** – worldwide, **B** – in Poland; **C–D** – proportion of ordinary H, L and LL chondrites. Despite slightly lower amount of ordinary chondrites in Poland than globally, the proportion of the individual groups is similar. Source of information on global collection: *Meteoritical Bulletin* and Grady (2000)

należy spojrzeć na tę sytuację jako na efekt niedostatecznego podnoszenia meteoroidów niespadkowych. Najprawdopodobniej ujawnia się tu problem niskiej rozpoznawalności meteoroidów w społeczeństwie.

2. Wśród obserwowanych spadków meteoroidowych, proporcje różnych typów meteoroidów w kolekcji polskiej są niemal identyczne jak proporcje w skali światowej (ryc. 8D–E), co jest zgodne z równomiernym dopływem materiału meteoroidowego na całym globie i potwierdza, że kolekcja polska może być uważana za statystycznie istotną próbę.
3. Najbardziej widoczną cechą odróżniającą kolekcję polską od kolekcji ogólnoświatowej jest pewna nadreprezentatywność meteoroidów żelaznych (ryc. 7B). W skali świata meteoroidy żelazne stanowią 2% kolekcji, natomiast w Polsce – 25%. Wśród polskich meteoroidów niespadkowych (ryc. 8G) ponad połowa to meteoroidy żelazne, a raptem 33% to chondryty. Dla porównania, w kolekcjach światowych meteoroidy żelazne są znajdowane w oderwaniu od okoliczności spadku w 27% przypadków, a chondryty w 68% (ryc. 8F). Meteoroidy żelazne mają wyższą odporność na wietrzenie i nie ulegają dezintegracji tak szybko jak chondryty, co wpływa na ich zwiększoną znajdo-

walność i statystycznie podwyższoną ilość tych meteoroidów znalezisk. Jednak w kolekcji polskiej liczba meteoroidów żelaznych jest dwukrotnie większa od oczekiwanej, co prawdopodobnie wynika z faktu, że meteoroidy żelazne bardziej zwracają uwagę potencjalnego znalazcy i podnoszone są przez amatorów z większym prawdopodobieństwem niż chondryty. To dodatkowo potwierdza wniosek z punktu 1, że niższa niż oczekiwana liczba znalezisk meteoroidowych w Polsce odzwierciedla niewystarczającą rozpoznawalność meteoroidów – zwłaszcza chondrytów – przez społeczeństwo.

Podsumowując wnioski płynące z analizy statystycznej, zwiększenie świadomości społecznej w zakresie rozpoznawania meteoroidów skutkowało by prawdopodobnie zwiększeniem liczby znalezisk meteoroidowych, szczególnie chondrytowych. Biorąc pod uwagę, że w Polsce w ciągu ostatnich 28 lat zostały podniesione zaledwie 4 meteoroidy spadkowe (Baszkówka, Sołtmany i Antonin oraz Leoncin; dla ostatniego opis okoliczności spadku jest nie do końca jasny i został zarejestrowany jako „prawdopodobny spadek”), jest niemal pewne, że wiele meteoroidów jest przeoczonych podczas spadku i istnieją szanse na ich podniesienie.





**Ryc. 8.** Proporcja meteorytów oraz rodzaj materiału wśród zaobserwowanych spadków i meteorytów znalezionych bez okoliczności spadku. W panelu **A** przedstawiono statystykę wszystkich meteorytów, jednak większość meteorytów pochodzi z organizowanych wypraw poszukiwawczych na Antarktydę i na pustynie piaszczyste. W panelach **B, D, F** wzięto pod uwagę wyłącznie meteoryty z obszarów zamieszkałych, które stanowią zaledwie 4% wszystkich meteorytów. Panele **B–C** to analiza kolekcji światowej i polskiej pod względem ilości zaobserwowanych spadków i znalezisk. W Polsce proporcja znalezisk jest mniejsza niż w skali światowej. Oznacza to, że nasze społeczeństwo ma dobrą świadomość dotyczącą fenomenu obserwowanego spadku meteorytu, jednak nie jest w stanie rozpoznać meteorytowego materiału natrafionego przypadkowo, bez okoliczności spadku. Panele **D–E** – proporcja poszczególnych typów meteorytów (chondryty, achondryty, meteoryty żelazne i żelano-kamiennie) wśród spadków na świecie i w Polsce. Statystyki dotyczące spadków są dla Polski niemal identyczne jak statystyki światowe, co jest zgodne z równomiernym rozkładem spadków materiały meteorytowego na całym świecie. Panele **F–G** – proporcja poszczególnych typów meteorytów wśród znalezisk na świecie i w Polsce. W Polsce zaznacza się duża nadreprezentatywność meteorytów żelaznych, która odzwierciedla prawdopodobnie ogólny brak umiejętności rozpoznania skały chondrytowej i tym samym brak reakcji przy przypadkowym natknięciu się na chondryt, podczas gdy meteoryty żelazne zwracają uwagę przy przypadkowym znalezieniu i trafiają do analizy naukowej. Źródło informacji dotyczącej meteorytów w skali światowej: *Meteoritical Bulletin* oraz Grady (2000)

**Fig. 8.** Proportion of meteoritic falls and finds and distribution of meteorite types within these two categories. In panel **A**, statistics including all meteorites are shown, but majority of meteorite finds comes from hot and cold deserts. These are excluded from analysis presented in panels **B, D, F**. Meteorite falls and finds from populated areas constitute 4% of all meteorites worldwide. Panels **B–C** – analysis of global and Polish collection in terms of proportion of falls and finds. In Poland, number of finds, compared to falls, is much smaller than it is globally. This most likely implies that our society has good awareness regarding the phenomenon of meteorite fall. However, people are not able to recognize a meteorite if found accidentally. Panels **D–E** – analysis of meteorite types (chondrites, achondrites, iron and stony-iron meteorites) within falls. Types of meteorites among Polish falls almost perfectly mirror the distribution worldwide, which agrees with an even supply of meteoritic material across the globe. Panels **F–G** – analysis of meteorite types within finds. In Poland, iron meteorites are significantly overrepresented. It probably reflects inability of citizens to recognize chondritic material, if found accidentally, while iron meteorites are more outstanding and therefore more likely to attract attention. Source of information on global collection: *Meteoritical Bulletin* and Grady (2000)

Analizy kolekcji polskich meteorytów wskazują na konieczność zwiększenia świadomości społeczeństwa w zakresie rozpoznawania meteorytów, a także na potrzebę inwestycji w sieci bolidowe i współpracę środowisk naukowych z poszukiwaczami amatorami.

## PODSUMOWANIE

- ❑ W powyższej pracy zaprezentowano zarys charakterystyki petrograficznej i chemicznej najnowszego meteorytu spadkowego w Polsce – meteorytu Antonin. Analizy meteorytu były zebrane w celu klasyfikacji wykonanej przez nasz zespół i opublikowanej w *Meteoritical Bulletin*. Meteoryt Antonin to chondryt L5 S3, lokalnie wykazujący cechy mniej zrównoważonego materiału L4 i być może wyższego stopnia deformacji S4. Sama klasyfikacja Antonina, choć była zadaniem rutynowym, pozwoliła zauważyć, że skała przeszła interesującą historię termiczną i kolizyjną na ciele macierzystym (Shrubny i in., 2022; Krzesińska, 2023).
- ❑ Oprócz interesujących cech strukturalnych i chemicznych, meteoryt ten jest ogromnie istotny dla nauki z uwagi na fakt, że zarejestrowane zostało jego przejście przez atmosferę. Zapis trajektorii lotu pozwolił na rekonstrukcję orbity ciała macierzystego meteorytu. Obecnie w kolekcjach światowych jest zaledwie ok. 50 meteorytów, dla których znane są orbity heliocentryczne. Są one cennym źródłem informacji o dynamice ciał Pasa Planetoid.
- ❑ W Polsce mamy 26 zarejestrowanych meteorytów, z czego 4 były znalezione jako fragmenty biżuterii lub innych artefaktów archeologicznych oraz jako relikty w odsłonięciach geologicznych. Z pozostałych 22 meteorytów, dla których znane są okoliczności spadku, 20 zachowało się do dziś – 11 z nich było zaobserwowanych przy spadku, a pozostałe 9 to znaleziska. Meteoryt Antonin był podjęty zaraz po spadku, co znacząco podwyższa jego walory naukowe i kolekcjonerskie. Jednak spadek ten nie był zanotowany przez lokalną ludność i z dużym prawdopodobieństwem meteoryt nie zostałby zauważony, gdyby nie wyraźna obserwacja bolidowa i dedykowana wyprawa poszukiwawcza. Przykład Antonina pokazuje wartość inwestycji w działania sieci bolidowych.
- ❑ Odnalezienie meteorytu Antonin obrazuje bardzo dobrze przygotowanie terenowe i świadomość profesjonalnych prywatnych polskich poszukiwaczy meteorytów. Niestety brak jest inicjatyw poszukiwawczych w środowiskach naukowych oraz brak programów zrzeszających poszukiwaczy wolontariuszy. Polskie jednostki naukowe nie mają także funduszy na zakup wyjątkowego materiału, który sam przybył do nas z kosmosu. Stan taki poskutkował faktem, że depozyt naukowy tego unikatowego meteorytu to zaledwie 21 g materiału (minimum wymagane do klasyfikacji), a masa główna meteorytu pozostaje w rękach prywatnego znalazcy.
- ❑ Na świecie powstają i funkcjonują programy edukacyjne zwiększające zaangażowanie lokalnych społeczności w inicjatywy poszukiwania meteorytów, szczególnie tych zaobserwowanych przez sieci bolidowe. Spadek Antonina, a także przegląd kolekcji polskich meteorytów, pokazują, że w Polsce potrzeba takich programów. Ponieważ *Przegląd Geologiczny* dociera do czytelników zarówno na uniwersytetach, jak i do lokalnych społeczności geologicznych, pisząc ten artykuł, liczymy na zainteresowanie powyższym problemem. Jesteśmy chętni odpowiedzieć na pytania oraz wspomóc edukację w zakresie rozpoznawania i poszukiwania meteorytów.
- ❑ Kolekcja polskich meteorytów jest reprezentatywna w sensie proporcji materiału różnych typów. Przeważają w niej chondryty zwyczajne, zwłaszcza wśród obserwowanych spadków, co jest odzwiercie-



**Ryc. 9.** Mapa Polski z zaznaczonymi miejscami spadku lub znalezienia oficjalnie zarejestrowanych polskich meteorytów. Czerwona czcionka – obserwowane spadki (Żagań i Ratyń były obserwowanymi spadkami) (Pokrzywnicki, 1964), jednak same meteoryty się nie zachowały, meteoryty te nie były wzięte pod uwagę do statystyk zaprezentowanych na ryc. 7 i 8, czarna czcionka – znaleziska bez znanych okoliczności spadku. Interaktywna mapa polskich meteorytów, zawierająca także informację o lokalizacji meteorytów kopalnych oraz artefaktów wykonanych z meteorytów dostępna jest na stronie: [http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Kategoria: Meteoryty\\_polskie](http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Kategoria: Meteoryty_polskie)

**Fig. 9.** Location of Polish meteorite falls and finds. Red font – falls (Żagań and Ratyń were falls) (Pokrzywnicki, 1964), but the specimens themselves are lost from collections. They are not taken into account in statistics presented in Figs. 7 and 8. Black font – finds. Interactive map of Polish meteorites, which includes additional information about relict meteorites and archaeological artefacts made of meteoritic iron is available at: [http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Kategoria: Meteoryty\\_polskie](http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Kategoria: Meteoryty_polskie)

deniem normalnego dopływu materii kosmicznej. Wśród znalezisk zaznacza się pewna nadreprezentatywność meteorytów żelaznych, która jest prawdopodobnie wynikiem ich łatwiejszego odnalezienia w oderwaniu od okoliczności spadku. Przewaga spadków nad znaleziskami oraz większość meteorytów żelaznych wśród polskich znalezisk sugerują, że wiele meteorytów pozostaje niezauważonych przy spadku i te, zwłaszcza chondryty, później nie są podjęte, przez co ulegają dezintegracji.

Dziękujemy recenzentom, prof. Andrzejowi Muszyńskiemu oraz prof. Krzysztofowi Szopie, za wnikliwe uwagi dotyczące manuskryptu. Podziękowania należą się też wszystkim, którzy przyczynili się do odnalezienia meteorytu i do dostarczenia go do badań. W szczególności dziękujemy Andrzejowi Owczarzakowi, Marcinowi Stolarzowi, Arkowi Bingorajowi oraz znalazcy, Kryspinowi Kmiecikowi.

## LITERATURA

- BABCZYŃSKI T., DEIKE K., WAWNIKIEWICZ R. 1868 – Notice sur la météorite tombée le 30 Janvier 1868 aux environs de la ville de Pułtusk. Publié par la Haute Ecole de Varsovie, Warszawa 26 maja 1868.
- BLAND P.A. 2001 – Quantification of meteorite infall rates from accumulations in deserts, and meteorite accumulations on Mars. *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*, 207–303.
- BISCHOFF A., PATZEK M., PETERS S.T.M., BARRAT J.-A., DI ROCCO T., PACK A., EBERT S., JANSEN C.A., KMIĘCIAK K. 2022 – The chondrite breccia of Antonin (L4-5) – A new meteorite fall from Poland with a heterogeneous distribution of metal. *Meteorit. Planet. Sci.*, 57: 2127–2142.
- BOROVIČKA J., SPURNÝ P., SHRBNÝ L., ŠTORK R., KOTKOVÁ L., FUCHS J., KECLÍKOVÁ J., ZICHOVÁ H., MÁNEK J., VÁCHOVÁ P., MACOURKOVÁ I., SVOREŇ J., MUCKE H. 2022 – Data on 824 fireballs observed by the digital cameras of the European Fireball Network in 2017–2018 I. Description of the network, data analysis, and the catalog. *Astronom. Astrophys.*, 667: A157.

- BORUCKI J., STĘPNIEWSKI M. 2001 – Mineralogy of the Baszkówka chondrite (L5 S1): new data on silicates, opaques and minor minerals. *Geol. Quart.*, 45: 229–256.
- BREARLEY A.J., JONES R.H. 1998 – Chondritic meteorites. [W:] Papike J.J. (red.), *Planetary Materials*, Mineralogical Society of America, 36: 3-01-3-398.
- EVATT G.W., SMEDLEY A.R.D., JOY K.H., HUNTER L., TEY W.H., ABRAHAM I.D., GERRISH L. 2020 – The spatial flux of Earth's meteorite falls found via Antarctic data. *Geology*, 48: 683–687.
- GRADY M.M. 2000 – Catalogue of meteorites. 5<sup>th</sup> edition. Cambridge University Press.
- HALLIDAY I.A. 2001 – The present day flux of meteorites to Earth. *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*, 305–318.
- HUTCHISON R. 2004 – Meteorites: A Petrologic chemical and Isotopic Synthesis. Cambridge University Press Cambridge United Kingdom. [http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Kategoria:Meteority\\_polskie](http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Kategoria:Meteority_polskie)  
<http://www.woreczko.pl/meteorites/>  
<https://www.cosmoartel.pl/>  
<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=70617>  
<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=77489>
- JULL A.J.T. 2011 – Terrestrial Ages of Meteorites. *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*, 241–266.
- KARWOWSKI Ł. 2012 – Softman meteorite. *Meteorites*, 1–2: 15–30.
- KARWOWSKI Ł., SZOPA K. 2020 – Leoncin – nowy polski chondryt LL4-6. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 11: 31–44.
- KARWOWSKI Ł., BADUR Ł., MAZUR M. 2009 – Meteoryt Świącany. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 1: 44–47.
- KARWOWSKI Ł., SZOPA K., WOŹNIAK M. 2021 – Nowe znalezisko meteorytu w południowej części województwa łódzkiego. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 12: 41–57.
- KOBYŁECKI M. 1938 – Charakterystyka ogólna meteorytu łowickiego. *Arch. Mineralog.*, 14: 9–14.
- KOTOWIECKI A. 2010 – Artifacts in Polish collections made of meteoritic iron. *Meteorit. Planet. Sci.*, 39: A151–156.
- KRZESIŃSKA A.M. 2016 – Thermal metamorphic evolution of the Pułusk H chondrite breccia – compositional and textural properties not included in petrological classification. *Geol. Quart.*, 60: 211–224.
- KRZESIŃSKA A.M. 2017 – Contribution of early impact events to metal-silicate separation thermal annealing and volatile redistribution: evidence in the Pułusk H chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.*, 52: 2305–2321.
- KRZESIŃSKA A.M. 2023 – Charakterystyka petrologiczna i chemiczna meteorytu Antonin – klasyfikacja oraz zarys historii termicznej i uderzeniowej. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 14: 114–133.
- KRZESIŃSKA A.M., ALMEIDA N.V. 2019 – Evidence of shock-induced vaporization of matrix to form porosity in Baszkówka, a porous L5 chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.*, 54: 54–71.
- KRZESIŃSKA 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-a chondrite transition. *Meteorit. Planet. Sci.*, 54: 1462–1477.
- KRZESIŃSKA A., GATTACCECA J., FRIEDRICH J.M., ROCHETTE P. 2015 – Impact-related non-coaxial deformation in the Pułusk H chondrite inferred from petrofabric analysis. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50: 401–417.
- MANECKI A. 1972 – Studium mineralogiczno-petrologiczne meteorytu Pułusk. *Pr. Mineralog.*, 27: 53–68.
- OWCZARZAK A. 2021 – Nowy spadek w Polsce. *Meteoryt*, 101: 15.
- PILSKI A.S. 1992 – Katalog meteorytów w polskich kolekcjach. *Meteoryt*, 4: 2–9.
- PILSKI A.S. 2001 – Inventory of Polish Meteorites. *Geol. Quart.*, 45: 219–228.
- PILSKI A.S., WASSON J.T., MUSZYŃSKA 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. *Meteorit. Planet. Sci.*, 48: 2531–2541.
- POKRZYWNICKI J. 1964 – Meteority Polski. Katalog meteorytów w zbiorach polskich. *Stud. Geol. Pol.*, 15.
- POUCHOU J.L., PICOIR F. 1991 – Quantitative Analysis of Homogeneous or Stratified Microvolumes Applying the Model "PAP". [W:] Heinrich K.F.J., Newbury D.E. (red.), *Electron Probe Quantification*. Plenum Press New York: 31–75
- PRZYLIBSKI T.A., PILSKI A.S., ZAGOŹDŹON P.P., KRYZA R. 2003 – Petrology of the Baszkówka L5 chondrite: A record of surface-forming processes on the parent body. *Meteorit. Planet. Sci.*, 38: 927–937.
- PRZYLIBSKI T.A., ZAGOŹDŹON P.P., KRYZA R., PILSKI A.S. 2005 – The Zakłodzie enstatite meteorite: Mineralogy, petrology, origin and classification. *Meteorit. Planet. Sci.*, 40: A185–A200.
- RÓŻYCKI S.Z., KOBYŁECKI M. 1935 – O meteorycie łowickim. *Wszehświat*, 5: 137–142.
- RUBIN A.E. 1990 – Kamacite and olivine in ordinary chondrites: intergroup and intragroup relationships. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: 1217–1232.
- RUBIN A.E. 2004 – Postshock annealing and postannealing shock in equilibrated ordinary chondrites: implications for the thermal and shock histories of chondritic asteroids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68: 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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 163: 219–233.
- SAMSONOWICZ J. 1952 – O wieku, pochodzeniu i przypuszczalnej ilości oraz masie meteorytu pułuskiego. *Wiad. Muz. Ziemi*, 6: 57–68.
- SHRBENÝ L., SPURNÝ P., BOROVIČKA J. 2020 – Fireball fragmentation in the first half of the atmospheric trajectory. *Planet. Space Sci.*, 187: 104956.
- SHRBENÝ L., KRZESIŃSKA A.M., BOROVIČKA J., SPURNÝ P., TYMIŃSKI Z., KMIĘCIAK 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. *Meteorit. Planet. Sci.*, 57: 2108–2126.
- SIEMIĄTKOWSKI J. 2001 – Petrography of the Baszkówka chondrite. *Geol. Quart.*, 45: 263–280.
- SPERGEL M.S., REEDY R.C., LAZARETH O.W., LEVY P.W., SLATEST L.A. 1986 – Cosmogenic neutron-capture-produced nuclides in stony meteorites. *J. Geophysic. Res.*, 91: D483–D494.
- STÖFFLER D., KEIL K., SCOTT E.R.D. 1991 – Shock metamorphism in ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 3845–3867.
- SZOPA K., BRACHANIEC T., KARWOWSKI Ł., KRZYKAWSKI T. 2017 – Remnants of altered meteorite in the Cretaceous-Paleogene clay boundary in Poland. *Meteorit. Planet. Sci.*, 52: 612–622.
- SZOPA K., KARWOWSKI Ł., KRZYKAWSKI T., BRACHANIEC T. 2017 – Fragmenty kopalnego meteorytu z Lechówki: charakterystyka mineralogiczna i geochemiczna. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 8: 100–109.
- TYMIŃSKI Z., ŻOŁĄDEK P., WIŚNIEWSKI M., STOLARZ M., POLAKOWSKI K., MYSZKIEWICZ M., ZARĘBA P., GAWROŃSKI M.P., SUCHODOLSKI T., OLECH A. 2019 – 15 lat obserwacji – wybrane spadki meteorytów rejestrowane w PFN w latach 2004–2019. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 10: 160–167.
- TYMIŃSKI Z., ŻOŁĄDEK P., WIŚNIEWSKI M., STOLARZ M., POLAKOWSKI K. 2021 – Raport PFN z poszukiwan meteorytów w latach 2018–2020. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 12: 98–107.
- TYMIŃSKI Z., HULT M., KRZESIŃSKA A.M., LUTTER G., TYMIŃSKA K., SAGANOWSKI P., MARISSENS G., STROH H., BURAKOWSKA A., ZIEMEK T., STACHOWICZ M., EL-MALLUL A. 2023a – Underground Radioactivity Measurements of Meteorites: Development of Development of Methods Suitable to Determine Precise Terrestrial Age of Recent Falls. *Appl. Radiat. Isotop.*, 195: 110733.
- TYMIŃSKI Z., BURAKOWSKA A., KRZESIŃSKA A.M., TYMIŃSKA K., KUĆ M., ILLER E. 2023b – Radionuklidy kosmogeniczne w meteorycie Antonin. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 14: 192–199.
- VAN SCHMUS W.R., WOOD J. 1967 – A chemical-petrologic classification of the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31: 747–765.
- WIŚNIEWSKI M., ŻOŁĄDEK P., OLECH A., TYMIŃSKI Z., MACIEJEWSKI M., FIETKIEWICZ K., RUDAWSKA R., GOZDALSKI M., GAWROŃSKI M., SUCHODOLSKI T., MYSZKIEWICZ M., STOLARZ M., POLAKOWSKI K. 2017 – Current status of Polish Fireball Network. *Planet. Space Sci.*, 143: 12–20.
- WOŹNIAK M. 2021 – Meteority żelazne – klasyfikacja w obrazach. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 12: 149–216.
- WOŹNIAK B., WOŹNIAK M. 2012 – Account of circumstances surrounding the fall of a meteorite in Softmany village. *Meteorites*, 1–2: 9–14. [www.asu.cas.cz/~meteor/bolid/2021\\_07\\_15/](http://www.asu.cas.cz/~meteor/bolid/2021_07_15/)

Praca wpłynęła do redakcji 27.04.2023 r.  
Akceptowano do druku 10.08.2023 r.