

Tadeusz A. PRZYLIBSKI<sup>1</sup>, Katarzyna ŁUSZCZEK<sup>1</sup>, Konrad BLUTSTEIN<sup>1</sup>

## Planimetrowanie ziaren FeNi jako metoda ustalenia stopnia wietrzenia W0–W4 chondrytów zwyczajnych

FeNi grains planimetry as a method to establish weathering grade W0–W4 of ordinary chondrites

**Abstract:** Wlotzka scale (Wlotzka 1993) is commonly used to determine the weathering grade of ordinary chondrites. The scale is descriptive and based mostly on a subjective assessment of researcher. In this paper authors define a new, quantitative method to establish the W0–W4 weathering grade, which is based on planimetry of FeNi grains. Results of planimetry are compared with average content of FeNi metal in unweathered chondrites from the same group. Weathering grade estimated by this method are consistent with, or slightly different from the official one determined in classification, what proves the efficacy of the proposed method. Moreover, the method was applied to define weathering grade of meteoritic samples not classified so far: Pułtusk (W2), Thuathe (W2), Gao-Guenie (W2/W3), NWA 5205 (W3), NWA 4505 (W3), NWA 5296 (W2).

**Keywords:** meteorite, ordinary chondrite, ordinary chondrite weathering, weathering grade, FeNi alloy weathering, ordinary chondrites weathering scale, Wlotzka scale

### Wstęp

Jednym z istotnych elementów klasyfikowania chondrytów zwyczajnych jest ustalenie ich stopnia wietrzenia. Stopień wietrzenia jest miarą zmian, jakich doświadczył chondryt zwyczajny w wyniku oddziaływania na niego ziemskich czynników atmosferycznych od momentu spadku do momentu znalezienia lub do momentu podjęcia badań meteorytu. Oczywistym jest, że stopień wietrzenia rośnie wraz z czasem, jaki upływa od momentu spadku. Wzrost ten wyraża się poprzez narastające zmiany w składzie mineralnym chondrytu i w składzie chemicznym budujących go minerałów. Im mniejszy jest stopień wietrzenia, tym lepiej jego skład mineralny i chemiczny odzwierciedla skład chemiczny i mineralny skał macierzystych, budujących planetoidę, z której pochodzi chondryt zwyczajny. Dlatego szczególnym zainteresowaniem naukowców cieszą się przede wszystkim te chon-

<sup>1</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Zakład Geologii i Wód Mineralnych, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; e-mail: Tadeusz.Przylibski@pwr.edu.pl

dryty, które zostały znalezione na Ziemi tuż po spadku. Także wśród kolekcjonerów i dealerów meteoryty te są najbardziej popularne i cenione.

Badania procesów wietrzenia chondrytów zwyczajnych nie cieszą się zbyt wielkim zainteresowaniem ze strony nauki. Mechanizmy tych procesów i powodujące je czynniki nie różnią się bowiem od procesów wietrzenia skał ziemskich, które były przedmiotem badań prowadzonych znacznie wcześniej. Na ich podstawie już pod koniec XX wieku powstały opracowania monograficzne, podręczniki oraz programy komputerowe umożliwiające szczegółowe charakteryzowanie i modelowanie tych procesów (np. Drever 1985, White i Brantley 1995). Natomiast substratami w procesie wietrzenia chondrytów zwyczajnych są także minerały niewystępujące w skałach skorupy ziemskiej. Dzięki temu geochemiczna charakterystyka procesu ich wietrzenia może być interesująca. Mimo to badania wietrzenia chondrytów zwyczajnych prowadzone i publikowane są niezbyt często (np. Hutchison 2006, Bland i in., 2006, Gurdziel i Karwowski 2009a, b, Losiak i Velbel 2011, Jakubowska i in. 2017). Rutynowo prowadzone badania wietrzenia chondrytów zwyczajnych sprowadzają się najczęściej do ustalenia stopnia ich wietrzenia. Dopełnia on informacje niezbędne do sklasyfikowania meteorytu. Nie jest to jednak informacja konieczna do jego sklasyfikowania.

Proces wietrzenia, a zwłaszcza jego efekty zależą od rodzaju materiału poddanego ich działaniu, a więc grupy chemicznej i typu petrograficznego chondrytu zwyczajnego. Efekty wietrzenia zależą również od czasu działania czynników wietrzeniowych na chondryt oraz od ziemskiej strefy klimatycznej, w której spadł meteoryt. Stopień skomplikowania uwarunkowań decydujących o ostatecznym efekcie wietrzenia chondrytu zwyczajnego, podobnie zresztą jak i każdego innego meteorytu, powoduje duże trudności w zdefiniowaniu jakiejś absolutnej skali wietrzenia chondrytów zwyczajnych. W sposób sformalizowany skalę taką w odniesieniu do chondrytów zwyczajnych zaproponował Wlotzka (1993). Jest ona powszechnie używana do określania stopnia wietrzenia tych meteorytów przy ich klasyfikowaniu. Często jednak trudno jest jednoznacznie i obiektywnie określić stopień wietrzenia, gdyż różni badacze oceniają ten stopień według własnego doświadczenia i uznania. Badania różnych okazów tego samego chondrytu zwyczajnego przez różnych naukowców w różnym czasie od spadku mogą dawać znacznie różniące się wyniki. Powoduje to, że skala zaproponowana przez Wlotzkę jest używana głównie dlatego, że dotychczas nikt nie zaproponował w tym zakresie lepszego rozwiązania.

Skala ta obejmuje 7 stopni wietrzenia, które są scharakteryzowane opisowo w następujący sposób (Wlotzka 1993):

- W0: brak widocznego utlenienia minerałów; mogą być obserwowane żółto-brązowe naloty limonitu;
- W1: występują niewielkie obwódki tlenków żelaza wokół ziaren FeNi oraz FeS; występują niewielkie żyłki tlenków Fe;
- W2: około 20–60% obj. ziaren FeNi jest zmienionych przez utlenianie; powszechnie występują żyłki tlenków Fe;
- W3: mocne utlenienie; 60–95% obj. ziaren FeNi i FeS jest zastąpionych przez tlenki Fe;

- W4: widoczne jest całkowite (>95% obj.) utlenienie ziaren FeNi i FeS; krzemiany pozostają nieutlenione – nie są dotknięte procesem wietrzenia;
- W5: występują delikatnie zwiertzałe krzemiany maficzne, zwłaszcza wzdłuż spękań; kryształy oliwinów wykazują zmiany wietrzeniowe od wewnątrz;
- W6: widoczne jest powszechne zastępowanie pierwotnych krzemianów przez minerały ilaste i tlenki Fe.

Autorzy podjęli próbę ilościowego podejścia do skali Włotzki, mając nadzieję na uzyskanie wyniku bardziej miarodajnego, a przede wszystkim bardziej obiektywnego, niezależnego od osoby dokonującej klasyfikacji stopnia wietrzenia chondrytu zwyczajnego. Ponieważ w badaniach wykorzystano jedynie ziarna FeNi, możliwe było charakteryzowanie tylko stopni wietrzenia od W0 do W4. Efekty badań przedstawia niniejszy artykuł.

## Materiał i metody badań

Do badań wybrano 31 chondrytów zwyczajnych o różnym stopniu wietrzenia, w tym 12 chondrytów H. Dziewięć z nich ma oficjalnie zatwierdzone przez The Meteoritical Society stopnie wietrzenia W0–W4. Uwzględniono także 17 chondrytów L, z których 15 ma stopnie wietrzenia W0–W2 oraz 2 chondryty LL. Z tych ostatnich dla jednego określono stopień wietrzenia W2. Sześć spośród analizowanych meteorytów nie ma oficjalnie określonego stopnia wietrzenia w The Meteoritical Bulletin (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>). Jednak na podstawie uzyskanych wyników planimetrowania możliwe było przypisanie stopnia wietrzenia tych chondrytów. Zestawienie wszystkich meteorytów poddanych planimetrowaniu wraz z ich oficjalną klasyfikacją przedstawiono w tabeli 1.

Chondryty zwyczajne grupy H charakteryzują się wysoką ogólną zawartością żelaza. Zawierają około 7% obj. troilitu oraz 8% obj. minerałów FeNi. Charakteryzują się również największą zawartością piroksenów ubogich w wapń oraz najmniejszą zawartością oliwinów. Chondryty zwyczajne L mają małą ogólną zawartość żelaza. Zawartość objętościowa troilitu w tej grupie chondrytów wynosi około 7%, natomiast minerałów FeNi 3%. Mają również mniejszą zawartość objętościową piroksenów ubogich w wapń oraz większą oliwinów w stosunku do chondrytów grupy H. Najmniej licznie reprezentowaną w badaniach autorów pozostaje grupa chemiczna LL. Chondryty zwyczajne grupy LL charakteryzują się najmniejszą zawartością żelaza i żelaza metalicznego. Zawartość troilitu wynosi 5% obj., natomiast minerałów FeNi 2% obj. Grupa ta charakteryzuje się również najmniejszą zawartością objętościową piroksenów ubogich w wapń oraz największą zawartością oliwinów (Grady i in. 2014).

Badania wszystkich 31 chondrytów zwyczajnych przeprowadzono w Laboratorium Geologii i Planetologii Zakładu Geologii i Wód Mineralnych na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Do badań wykorzystano mikroskop polaryzacyjny Nikon ECLIPSE LV100POL, współpracującą z nim kamerę Nikon DS-Ri1 oraz program NIS-Elements BR 4.00.00 służący do analizy obrazu mikroskopowego. Próbkę w formie płytek cienkich wyciętych z me-

**Tabela 1.** Chondryty zwyczajne, których płytki cienkie zostały wyselekcjonowane do badań w podziale na grupy chemiczne. Zestawiono podstawowe dane klasyfikacyjne: typ petrograficzny, stopień szokowy i stopień wietrzenia.

Nazwa meteorytu	Typ petrograficzny	Stopień szokowy	Stopień wietrzenia
Chergach	H5	S3	W0
Tamdakht	H5	S3	W0
NWA 11778	H5	S2	W1
Dho 1647	H6	S2	W2
NWA 6541	H4/5	S1	W2
NWA 7160	H3	S2	W2
Pultusk	H5	S2*	W2*
Dho 1663	H5	S1	W3
NWA 4555	H4	S2	W3
SaU 544	H5	S2	W4
Gao-Guenie	H5	n.s.	W2***
Thuathe	H4/5	n.s.	n.s.
Sottmany	L6	S2	W0
NWA 869	L3-6	S3	W1
NWA 5507	L3	S2	W1
NWA 6255	L5	S4	W1
SaU 001	L5	S2	W1
NWA 6411	L5	S3	W1
NWA 7162	L3	S2	W1
NWA 6410	L6	S2	W1
NWA 11779	L6	S1	W1
NWA 6409	L6	S3	W1/2
NWA 7161	L3	S2	W1/2
NWA 4430	L3.8	S2	W2
NWA 4558	L4	S2	W2
NWA 4436	L4	S2	W2
NWA 4431	L5	S2	W2
NWA 5296**	L6	n.s.	n.s.
NWA 4505**	L4	n.s.	n.s.
NWA 5929	LL5	S2	W2
NWA 5205	LL3.2	n.s.	n.s.

n.s. – nie sklasyfikowano

\* – stopień szokowy i stopień wietrzenia badanych fragmentów zaczerpnięto z pracy Przylibskiego i Łuszczek (2018)

\*\* – nazwy tymczasowe (provisional names)

\*\*\* – według Jakubowskiej i in. (2017)

teorytów planimetrowano w świetle odbitym. Obraz mikroskopowy w 25-cio krotnym powiększeniu dzięki podłączonej do mikroskopu kamerze był przesyłany w czasie rzeczywistym do komputera i przechwytywany z wykorzystaniem programu NIS-Elements. Program ten umożliwia robienie zdjęć kamerą podłączoną do mikroskopu oraz ich składanie z dużą precyzją w obraz całej płytki cienkiej o bardzo wysokiej rozdzielczości. Po złożeniu obrazu przystąpiono do identyfikacji

badanych minerałów. W świetle odbitym można zaobserwować dwa rodzaje jasnych minerałów: minerały FeNi (kamacyt i taenit, a być może także i tetrataenit) oraz troilit (FeS). Minerały FeNi, które były celem badania, wyraźnie odróżniają się białą barwą wynikającą z dużej zdolności refleksyjnej, większej od troilitu, który ma barwę żółtą. W prowadzonych badaniach nie rozróżniano poszczególnych faz mineralnych FeNi. Wraz ze zmniejszaniem się powierzchni ziaren, trudniejsze staje się rozróżnienie ziaren FeNi od ziaren FeS.

W czasie wykonywania analiz mikroskopowych każde ziarno minerałów stopu FeNi należało zaznaczyć kursorem w celu wyznaczenia jego konturu przez program, który następnie obliczał zadaną powierzchnię. Każda z badanych płytek cienkich meteorytów zawierała od kilkuset do kilku tysięcy ziaren minerałów FeNi o powierzchni większej niż  $300 \mu\text{m}^2$ . Ziaren mniejszych nie uwzględniono podczas planimetrowania z uwagi na duże trudności z ich jednoznaczną identyfikacją. W programie NIS-Elements wyznaczano także manualnie powierzchnię całej próbki meteorytu. Otrzymane wyniki były eksportowane do arkusza kalkulacyjnego programu Excel, gdzie obliczano sumaryczną powierzchnię ziaren minerałów FeNi. Następnie uzyskany wynik dzielono przez powierzchnię chondrytu w płytce cieniowej w celu obliczenia procentowego udziału ziaren FeNi w powierzchni próbki badanego meteorytu. Na podstawie obserwacji mikroskopowych analizowanych chondrytów przyjęto założenie, że rozkład minerałów FeNi w meteorycie jest przypadkowy, nieuporządkowany i nie posiada kierunkowości, co pozwala założyć, że otrzymany udział procentowy powierzchni ziaren minerałów FeNi w powierzchni próbki (2D) jest równy objętościowej zawartości procentowej tych minerałów w całym meteorycie (3D), a także w jego skale macierzystej (na planetoidzie).

## Wyniki badań i ich dyskusja

Uzyskane wyniki planimetrowania płytek cienkich poszczególnych meteorytów porównano z procentową objętościową zawartością ziaren FeNi każdej grupy chemicznej chondrytów zwyczajnych według danych literaturowych (Grady i in. 2014; tab. 2). Założono, zgodnie z danymi Grady i współautorów, że niezwiertzałe chondryty H (W0) powinny zawierać średnio 8% obj. ziaren FeNi, niezwiertzałe chondryty L (W0) 3% obj., a niezwiertzałe chondryty LL (W0) 2% obj. tych ziaren. Odniesienie uzyskanych wyników planimetrowania do wspomnianych wartości pozwoliło obliczyć procentową zawartość ziaren zwiertzałych każdego z badanych meteorytów, stanowiącą różnicę pomiędzy średnią zawartością ziaren FeNi [% obj.] prezentowaną w literaturze, a zawartością tych ziaren w meteorycie uzyskaną podczas planimetrowania. Następnie porównano otrzymane wyniki procentowej zawartości ziaren zwiertzałych ze skalą wietrzenia Wlotzki (1993). Założono przy tym następujące przedziały zawartości zwiertzałych ziaren FeNi [% obj.] dla poszczególnych stopni skali Wlotzki:

- W0: <5%,
- W1: 5–20%,
- W2: 20–60%,

- W3: 60–95%,
- W4: >95%, przy jednoczesnym braku oznak wietrzenia krzemianów.

W ten sposób przypisano każdemu z badanych chondrytów stopień wietrzenia wynikający z planimetrowania, który został zestawiony ze stopniem wietrzenia określonym podczas klasyfikacji chondrytu (tab. 2).

Cztery z badanych meteorytów mają większą zawartość ziaren stopu FeNi w porównaniu z danymi literaturowymi (Grady i in. 2014). Wynika to najprawdopodobniej z nierównomiernego rozłożenia ziaren metalicznych w ich teksturze oraz/lub z obecności dużych ziaren, które znacznie zawyżyły wynik planimetrowania. Dwa z tych chondrytów (NWA 6255 i NWA 6411) charakteryzują się stopniem wietrzenia W1, w związku z czym wspomniane czynniki rzeczywiście mogą wpłynąć na większą od średniej zawartość ziaren FeNi uzyskaną podczas planimetrowania. Natomiast stopień wietrzenia chondrytów NWA 4436 i NWA 4431 określono jako W2. Zakładając, że zawierają one 20–60% obj. zwietrzałych ziaren FeNi muszą one charakteryzować się niehomogenicznym ich rozmieszczeniem oraz zawierać ziarna stopu FeNi o rozmiarach znacznie większych od przeciętnych, co potwierdziły obserwacje mikroskopowe. Planimetrowanie większej powierzchni meteorytu byłoby najlepszą metodą uzyskania bardziej miarodajnych wyników. Autorzy nie dysponowali jednakże większą liczbą płytek cienkich niezbędnych do badań. Fakt występowania w niektórych płytkach cienkich większej procentowej zawartości ziaren FeNi, niż podawana w literaturze jest zjawiskiem jak najbardziej zrozumiałym, gdyż podane przez Grady i współautorów (2014) dane są wartościami średnimi. Może się więc zdarzyć także przypadek takiego chondrytu zwyczajnego, w którym zawartość ziaren FeNi jest nieznacznie większa od wartości średniej dla danej grupy chemicznej.

Wyniki planimetrowania 7 spośród 25 badanych meteorytów są zgodne ze stopniem wietrzenia określonym podczas ich klasyfikacji zatwierdzonej przez The Meteoritical Society. Chondryt NWA 11779 zawiera 21% obj. ziaren zwietrzałych. Jest to wartość na granicy błędu oznaczenia i jego stopień wietrzenia można uznać za W1/W2, a więc także zgodny z oficjalną klasyfikacją. Osiem meteorytów charakteryzuje się większą zawartością zwietrzałych ziaren FeNi, niż wynikałoby to z oficjalnie zatwierdzonego ich stopnia wietrzenia. W związku z tym ich badane fragmenty mają stopień wietrzenia o jeden większy, niż podany w The Meteoritical Bulletin. Rozbieżność ta może być wynikiem postępującego procesu wietrzenia próbek tych meteorytów. Zdaniem autorów uzyskane wyniki należy uznać za praktycznie zgodne z oficjalnie przyjętymi stopniami wietrzenia w klasyfikacji tych chondrytów.

W przypadku czterech meteorytów (Dho 1647, NWA 5507, NWA 7162, NWA 6409) zawartość zwietrzałych ziaren metalicznych jest na tyle duża, że stopień wietrzenia badanych próbek należałoby określić jako o 2 stopnie większy od oficjalnie zatwierdzonego. Świadczy to o tym, że czas który minął od momentu klasyfikacji oraz warunki, w których były przechowywane te chondryty wpłynęły niekorzystnie na ich materię, prowadząc do zwiększenia stopnia utlenienia minerałów FeNi.

**Tabela 2.** Porównanie wyników planimetrowania ziaren FeNi z zawartością tych ziaren w poszczególnych grupach chondrytów zwyczajnych prezentowaną w literaturze (Grady i in. 2014) oraz zestawienie stopnia wietrzenia meteorytu określonego na podstawie wyników planimetrowania ze stopniem wietrzenia określonym podczas jego klasyfikacji i opublikowanym w the Meteoritical Bulletin<sup>#</sup>.

Nazwa meteorytu	Zawartość ziaren FeNi [% obj.]	Zawartość ziaren FeNi według Grady i in. (2014) [% obj.]	Zwierzające ziarna FeNi [% obj.]	Stopień wietrzenia na podstawie planimetrii autorów	Stopień wietrzenia według MetBull <sup>#</sup>	
Chergach	7,12	8	11,0	W1	W0	
Tamdakht	6,95		13,1	W1	W0	
NWA 11778	5,31		33,6	W2	W1	
Dho 1647	0,39		95,1	W4	W2	
NWA 6541	1,98		75,3	W3	W2	
NWA 7160	2,09		73,9	W3	W2	
Pultusk	3,81		52,4	W2	W2 <sup>§</sup>	
Dho 1663	0,19		97,7	W4	W3	
NWA 4555	3,99		50,1	W2	W3	
SaU 544	0,72		91,0	W3	W4	
Gao-Guenie	2,90		63,8	W2/W3	W2 <sup>***</sup>	
Thuathe	5,81		27,4	W2	n.s.	
Soitmany	2,74		3	8,7	W1	W0
NWA 869	2,51	16,3		W1	W1	
NWA 5507	0,45	85,0		W3	W1	
NWA 6255	3,12*	–		–	W1	
SaU 001	2,49	17,0		W1	W1	
NWA 6411	4,00*	–		–	W1	
NWA 7162	0,48	84,0		W3	W1	
NWA 6410	1,91	36,3		W2	W1	
NWA 11779	2,37	21,0		W1/W2	W1	
NWA 6409	0,28	90,7		W3	W1/2	
NWA 7161	2,12	29,3		W2	W1/2	
NWA 4430	2,37	21,0		W2	W2	
NWA 4558	1,96	34,7		W2	W2	
NWA 4436	4,31*	–		–	W2	
NWA 4431	5,04*	–		–	W2	
NWA 5296**	1,96	34,7		W2	n.s.	
NWA 4505**	0,56	81,3		W3	n.s.	
NWA 5929	1,54	2		23,0	W2	W2
NWA 5205	0,27			86,5	W3	n.s.

n.s. – nie sklasyfikowano

\* – badany fragment meteorytu zawiera więcej ziaren stopu FeNi od wartości podanej przez Grady i współautorów (2014); w związku z tym niemożliwe było obliczenie procentowej zawartości ziaren zwierzających zgodnie z przyjętą w tym artykule metodyką; a tym samym niemożliwe było określenie stopnia wietrzenia meteorytu na podstawie wyników planimetrowania.

\*\* – nazwy tymczasowe (provisional names)

\*\*\* – według Jakubowskiej i in. (2017)

# – <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>

§ – stopień szokowy i stopień wietrzenia badanych fragmentów zaczerpnięto z pracy Przylibskiego i Łuszczek (2018)



Meteoryt NWA 4555 ma natomiast zawartość zwietrziałych ziaren FeNi pozwalającą stwierdzić, że jego stopień wietrzenia wynosi W2, podczas gdy został on sklasyfikowany jako chondryt o stopniu wietrzenia W3. Podobnie SaU 544 w oficjalnej klasyfikacji ma przypisany stopień wietrzenia W4, natomiast z badań autorów wynika, że jest on nieznacznie mniejszy – W3. W tych dwóch przypadkach rozbieżność nie jest zbyt duża i może być wynikiem interpretacji klasyfikującego ten chondryt badacza na podstawie niewielkiego fragmentu dostępnego do badań. Takie wyjaśnienie wymagałoby jednakże potwierdzenia.

Sześć z badanych meteorytów nie miało podczas klasyfikacji określonego stopnia wietrzenia. Uzyskane wyniki planimetrowania ich niezwiertziałych ziaren FeNi pozwalają na stwierdzenie, że Gao-Guenie należałoby sklasyfikować jako chondryt o stopniu wietrzenia W2/W3. Przypisany przez autorów stopień wietrzenia chondrytu Gao-Guenie jest zgodny ze stopniem wietrzenia określonym dla tego chondrytu przez Jakubowską i współautorów (2017). Chondrytom Thuathe i NWA 5296 należy przypisać stopień wietrzenia W2, a chondryty NWA 4505 oraz NWA 5205 charakteryzują się stopniem wietrzenia W3. Fragmentom chondrytu Pułtusk, którym dysponowali autorzy, został przez nich przypisany na podstawie obserwacji mikroskopowych stopień wietrzenia W2 (Przylibski i Łuszczek 2018), który potwierdziły wyniki planimetrowania przeprowadzone na potrzeby tego artykułu.

Ziarna FeNi czterech z badanych chondrytów planimetrowane były niezależnie przez dwoje autorów tego artykułu (Katarzynę Łuszczek – K.Ł. i Konrada Blutstein – K.B.) w celu zweryfikowania wpływu czynnika ludzkiego na wyniki pomiaru (tab. 3). Wyniki planimetrowania ziaren metalicznych chondrytów Chergach i Gao-Guenie różnią się nieznacznie (o mniej niż 0,1% obj.), w związku z czym na ich podstawie można meteorytom tym przypisać jednoznacznie ten sam stopień wietrzenia, odpowiednio W1 oraz W2/W3. W przypadku dwóch pozostałych meteorytów wyniki planimetrowania uzyskane przez dwie osoby różnią się o około 1,2% obj. Zgodnie z wynikami otrzymanymi przez K.Ł. meteoryt NWA 4555, zawierający 50% obj. zwietrziałych ziaren FeNi, należałoby sklasyfikować jako W2, podczas gdy wyniki uzyskane przez K.B. świadczą o tym, że zawiera on 65% obj.

**Tabela 3.** Porównanie wyników planimetrowania tych samych płytek cienkich wybranych chondrytów zwyczajnych przez różnych badaczy (Katarzynę Łuszczek – K.Ł., Konrada Blutstein – K.B.).

Nazwa meteorytu	Ziarna FeNi wg K.Ł. [% obj.]	Ziarna FeNi wg K.B. [% obj.]	Stopień wietrzenia wg K.Ł.	Stopień wietrzenia wg K.B.	Stopień wietrzenia MetBull
Chergach	7,12	7,03	W1		W0
Tamdakht	6,95	8,09*	W1	W0 (?)	W0
NWA 4555	3,99	2,79	W2	W3	W3
Gao-Guenie	2,90	2,82	W2/W3		W2**

\* – badany fragment meteorytu zawiera więcej ziaren stopu FeNi od wartości podanej przez Grady i współautorów (2014); w związku z tym niemożliwe było obliczenie procentowej zawartości ziaren zwietrziałych zgodnie z przyjętą w tym artykule metodyką; a tym samym niemożliwe było określenie stopnia zwietrzenia meteorytu na podstawie wyników planimetrowania; przyjęto arbitralnie stopień wietrzenia W0.

\*\* – według Jakubowskiej i in. (2017)



zwietrziałych ziaren FeNi i tym samym posiada stopień wietrzenia W3 – zgodny z oficjalną klasyfikacją tego meteorytu (tab. 3). Chondryt Tamdakht według pomiarów K.Ł. zawiera 11% obj. zwietrziałych ziaren FeNi. Stanowi więc on materię reprezentującą stopień wietrzenia W1, zawierającą 5–20% zwietrziałych ziaren FeNi. Natomiast K.B. w wyniku planimetrowania uzyskał zawartość ziaren FeNi nieznacznie większą (około 0,1% obj.) od prezentowanej w literaturze (Grady i in. 2014), co uniemożliwia obliczenie procentowej zawartości ziaren zwietrziałych zgodnie z przyjętą metodyką. Jednak tak duża zawartość ziaren metalicznych świadczy z pewnością o małym stopniu wietrzenia tego chondrytu (W0–W1). Wyniki planimetrowania meteorytu Tamdakht przez oboje autorów dają wyniki zgodne z jego oficjalnie przyjętym w klasyfikacji stopniem wietrzenia W0 (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>).

## Wnioski

Zaproponowane przez autorów ilościowe podejście do określania stopnia wietrzenia chondrytów zwyczajnych może być bardziej obiektywne, niż uznaniowe stosowanie klasyfikacji Wlotzki. Podejście to wymaga dużego nakładu pracy i dostępu do specjalistycznego mikroskopu petrograficznego i oprogramowania komputerowego, a także pewnego doświadczenia w analizie obrazu mikroskopowego w zakresie rozpoznawania ziaren FeNi. Zaproponowana metoda planimetrowania niezwietrziałych ziaren FeNi ogranicza także możliwość określenia stopnia wietrzenia chondrytu zwyczajnego w zakresie W0–W4 według skali zaproponowanej przez Wlotzkę.

Przeprowadzone pomiary wykazały, że nawet zastosowanie możliwie obiektywnej metody planimetrowania ziaren FeNi nie jest w stanie wyeliminować całkowicie trudności związanych z określaniem stopnia wietrzenia chondrytów zwyczajnych. Wynika to z faktu bardzo opisowego charakteru skali wietrzenia zaproponowanej przez Wlotzkę.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że w większości przypadków w odniesieniu do każdej grupy chemicznej chondrytów zwyczajnych wyniki planimetrowania ziaren FeNi pozwalają uzyskać stopień wietrzenia zgodny z oficjalnie przyjętym w klasyfikacji lub różniący się o jeden stopień. W takiej opisowej klasyfikacji niezgodność o jeden stopień w skali wietrzenia jest do zaakceptowania. Niemniej jednak dla kilku meteorytów uzyskane wyniki planimetrowania odbiegały istotnie od stopnia wietrzenia sklasyfikowanych meteorytów, zwykle o 2 stopnie w skali Wlotzki. Może to być efektem postępowania procesu wietrzenia od momentu klasyfikacji meteorytu do momentu przeprowadzenia kolejnych jego badań. Mniej prawdopodobne jest popełnienie błędów przez klasyfikującego meteoryt badacza, np. w wyniku obserwacji zbyt małego (nie dość dobrze reprezentującego cały meteoryt) okazu przeznaczonego do klasyfikacji.

Autorzy uważają, że planimetrowanie ziaren FeNi może w wielu przypadkach, zwłaszcza mniej doświadczonych klasyfikatorów, ułatwić określenie prawidłowego stopnia wietrzenia chondrytu zwyczajnego. Wykazano bowiem, że planimetrowa-

nie tych samych płytek cienkich przez różnych autorów najczęściej daje podobne rezultaty. Im większą liczbą płytek dysponuje klasyfikujący meteoryt badacz, tym bardziej wiarygodny i dokładny jest wynik planimetrowania.

Przeprowadzone badania pozwoliły także określić stopnie wietrzenia dla kilku chondrytów zwyczajnych, których nie określono przy klasyfikacji. Na podstawie dostępnych do badań płytek cienkich wycinanych na krótko przed analizą mikroskopową autorzy stwierdzili, że chondryty: Pułtusk, Gao-Guenie, Thuathe, NWA 5296, NWA 4505 oraz NWA 5205 mają odpowiednio stopnie wietrzenia: W2, W2/W3, W2, W2, W3 oraz W3.

## Podziękowania

W artykule wykorzystano część wyników badań zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej Katarzyny Łuszczek i pracy magisterskiej Konrada Blutstein, wykonywanych pod opieką naukową Tadeusza Przylibskiego. Wyniki badań zrealizowano dzięki funduszom publicznym w ramach zleceń: 0402/0038/18 oraz badań statutowych realizowanych w roku 2018 na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Autorzy pragną podziękować Agnieszce Mirek za konstruktywną recenzję.

## Literatura

- Bland P.A., Zolensky M.E., Benedix G.K., Sephton M.A., 2006, *Weathering of chondritic meteorites*, [w:] Lauretta D.S., McSween H.Y. Jr. (red.), *Meteorites and the early Solar System II*, The University of Arizona Press, Tucson in collaboration with Lunar and Planetary Institute, Houston.
- Drever J.I., 1985, *The Chemistry of Weathering*, O. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Grady A., Giovanni P., Moggi-Cecchi V., 2014, *Atlas of Meteorites*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Gurdziel A., Karwowski Ł., 2009a, *Procesy wietrzenia w meteorycie Pułtusk (wstępne wyniki badań)*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 1, s. 23–27.
- Gurdziel A., Karwowski Ł., 2009b, *Wietrzenie meteorytów na przykładzie Moraska i Pułtuska*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 1, s. 28–34.
- Hutchison R., 2006, *Meteorites. A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jakubowska M., Rzepecka P., Duda P., Woźniak M., Gałązka-Friedman J. 2017, *Badania mössbauerowskie chondrytów zwyczajnych typu H potwierdzają stopień ich zwiertżenia określony za pomocą skali W*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 8, s. 63–72.
- Losiak A., Velbel M.A., 2011, *Evaporite formation during weathering of Antarctic meteorites – A weathering census analysis based on the ANSMET database*, Meteoritics & Planetary Science 46, 3, s. 443–458, doi: 10.1111/j.1945-5100.2010.01166.x
- Przylibski T.A., Łuszczek K., 2018, *Wyniki badań mineralogicznych i petrologicznych nowych okazów meteorytu Pułtusk w 150 rocznicę spadku*, Przegląd Geologiczny, 66, 6, s. 386–378.
- White A.F., Brantley S.L., 1995, *Chemical weathering rates of silicate minerals*, Reviews in Mineralogy, 31, Mineralogical Society of America, Washington, D.C.
- Wlotzka F., 1993, *A weathering scale for the ordinary chondrites*, Meteoritics, 28, 460.
- <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> – dostęp 25.11.2018.