

Marian SZURGOT¹

Średni ciężar atomowy chondrytu Vicência (LL3.2)

Mean atomic weight of Vicência LL3.2 chondrite

Abstract: Mean atomic weight A_{mean} of Vicência (LL3.2 S1W0, fall 2013) ordinary chondrite has been calculated using literature data (Keil et al. 2015) on chemical composition of the meteorite and using relationships: between mean atomic weight and Fe/Si atomic ratio, between A_{mean} and grain density, and between A_{mean} and magnetic susceptibility.

It was shown that Vicência's $A_{mean} = 22.91$ for composition without water. This value is close to the mean atomic weight of LL chondrite falls, is close to A_{mean} value of LL3 chondrite falls, and is close to A_{mean} value of Semarkona LL3.0 chondrite. Vicência's Fe/Si atomic ratio (0.492 ± 0.050) leads to $A_{mean} = 23.06 - 23.26$, which is close to the value determined by bulk composition. Vicência's Fe/Si atomic ratio is close to the value for Semarkona's ($Fe/Si = 0.511$), and is close to LL's mean Fe/Si ratio (0.520). This confirms that Vicência belongs to LL chondrites, as previously classified.

Using dependence between mean atomic weight and grain density leads to $A_{mean} = 21.89 \pm 0.54$ ($dgr = 3.28 \text{ g/cm}^3$, Keil et al. 2015), and using dependence between A_{mean} and magnetic susceptibility gives $A_{mean} = 23.01 \pm 0.24$ ($\log \chi = 4.30$, Keil et al. 2015). Arithmetic mean of $A_{mean}(dgr)$, $A_{mean}(\log \chi)$, and $A_{mean}(Fe/Si)$, gives 22.72 ± 0.73 , the value close to $A_{mean}(\text{bulk composition})$ determined using compositional data.

Mean atomic number Z_{mean} , and A_{mean}/Z_{mean} ratio of the meteorite have been also calculated. Vicência's $Z_{mean} = 11.37$, and A_{mean}/Z_{mean} ratio is: 2.015 for composition without water. Vicência's silicates shown the values: $A_{mean} = 21.67$, $Z_{mean} = 10.76$, $A_{mean}/Z_{mean} = 2.014$, $Fe/Si = 0.318$, $A_{mean}(Fe/Si) = 22.07 - 22.18$, and Fe, Ni metal values: $A_{mean} = 56.63$, $Z_{mean} = 26.53$, and $A_{mean}/Z_{mean} = 2.135$.

Two dependences: i) grain density dgr on A_{mean} , and ii) grain density dgr on Fe/Si atomic ratio, were used to determine/verify grain density of Vicência chondrite. It was established that $dgr(A_{mean})$ leads to the values: 3.42 g/cm^3 for Vicência chondrite, 3.25 g/cm^3 for silicates, and 7.90 g/cm^3 for Fe, Ni metal of Vicência meteorite. Dependence $dgr(Fe/Si)$ predicts density for Vicência chondrite: $3.47 - 3.49 \text{ g/cm}^3$, and for silicates: $3.32 - 3.35 \text{ g/cm}^3$.

Keywords: Vicência chondrite, ordinary chondrites, LL3 chondrites, mean atomic weight, mean atomic number, grain density, iron to silicon ratio, Mössbauer spectroscopy, troilite content

¹ Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki Politechniki Łódzkiej, Al. Politechniki 11, 90-924 Łódź; e-mail: mszurgot@p.lodz.pl; maszurgot@gmail.com

Wstęp

Chondryty należą do grupy meteorytów, które zostały utworzone w początkach formowania Układu Słonecznego. Zawierają zapis ewolucji naszego układu planetarnego, a analiza ich pierwiastków i minerałów oraz właściwości fizycznych dostarcza wiedzy o historii, ewolucji i przeobrażeniach materii Wszechświata.

Ciężar atomowy określa szereg właściwości fizycznych materiałów i jest ważnym parametrem fizycznym przydatnym do analizy geochemicznej i geologicznej obiektów kosmicznych, wykorzystywanym do analizy budowy wewnętrznej planet, planetoid i Księżyca (Birch 1961, Ringwood 1966, Anderson i Kovach 1967, Anderson i Jordan 1970, Anderson 1989, Maj 1998, Szurgot 2015a–e, 2016a–d, 2017a–f, 2018, Szurgot i in. 2017). Zainteresowanie badaniami tej ważnej wielkości fizycznej wynika z potrzeby znajomości ciężaru atomowego do analizy materii ziemskiej i pozaziemskiej, minerałów i skał planet, planetoid i komet, określenia wpływu ciężaru atomowego na inne właściwości fizyczne i ujawnienia współzależności między nimi.

Liczba porządkowa to także bardzo ważna wielkość fizyczna, istotna dla badań materii pozaziemskiej. Wiedza o średniej liczbie porządkowej meteorytów jest potrzebna dla przewidywania i opisu właściwości fizycznych meteoroidów i ich ciał macierzystych oraz dla analizy procesów zachodzących w materii pozaziemskiej na różnych etapach jej ewolucji. Wiedza ta jest ważną dla niektórych współczesnych technik badawczych stosowanych w meteorytyce. Na przykład kontrastowość obrazów BSE mikrostruktury meteorytów tworzonych za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej jest uwarunkowana różnicami w średniej liczbie porządkowej minerałów składowych meteorytów. Oddziaływanie wiązki elektronowej omiatającej powierzchnię badanej skały pozaziemskiej zależy od średniej liczby porządkowej badanego obszaru skały, stąd ilość elektronów wstecznie rozproszonych, a zatem i kontrast obrazu są zależne, przy danych warunkach pracy mikroskopu elektronowego, od średniej liczby porządkowej.

Stosunek średniego ciężaru atomowego do średniej liczby porządkowej ilustruje współzależność obu tych wielkości i może być wykorzystany do wyznaczenia jednej z nich, przy pomocy wielkości drugiej.

Celem prezentowanych badań było określenie i zanalizowanie średniego ciężaru atomowego A_{mean} i średniej liczby porządkowej Z_{mean} meteorytu Vicência, sklasyfikowanego jako chondryt zwyczajny LL3.2 S1 W0 (Keil i in. 2015), określenie zawartości troilitu i gęstości ziaren części krzemianowej i metalicznej, oraz zweryfikowanie globalnej gęstości ziaren tego chondrytu w oparciu o nowo odkryte przez autora zależności łączące gęstość ze średnim ciężarem atomowym i stosunkiem atomowym Fe/Si materii pozaziemskiej: meteorytów, planet ziemskich i Księżyca.

Meteoryt Vicência należy do najnowszych, od niedawna badanych skał pozaziemskich. Spadek chondrytu Vicência nastąpił w roku 2013 w stanie Pernambuco w Brazylii, w wiosce Borracha w pobliżu Vicência (Keil i in. 2015). Na terenie Brazylii zaobserwowano dotychczas trzy spadki chondrytów zwyczajnych grupy LL: w roku 1967 były to meteoryty Baritizal (LL3.2) oraz Parambu (LL5), a w 2013 roku była to Vicência (LL3.2) (Gomes i Keil 1980, Meteoritical Bulletin Database 2018).

Do tej samej grupy chondrytów LL należą ostatnio badane przez autora meteoryty: chondryt zwyczajny LL3.0 Semarkona (Szurgot 2017b), chondryty LL5: Chelyabinsk i Olivenza (Szurgot 2015d, 2018), Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915 (Szurgot 2016d), a także dwa chondryty LL6: Ensisheim (Szurgot 2017c) oraz Stubenberg (Szurgot 2017d).

Metody badań

Praca ma charakter teoretyczny. Obliczeń średniego ciężaru atomowego dokonano wykorzystując zależności stosowane przez autora w badaniach meteorytów, planet ziemskich i Księżyca (Szurgot 2015a–e, 2016a–d, 2017a–e, 2018, Szurgot i in. 2017).

Literaturowe dane eksperymentalne o średnim składzie pierwiastkowym chondrytu Vicência (Keil i in. 2015) uzyskane za pomocą dwu współczesnych metod analitycznych: ICP-OES (Optycznej Spektrometrii Emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnej sprzężonej) oraz INAA (Instrumentalnej Neutronowej Analizie Aktywacyjnej), zostały wykorzystane przez autora do określenia średniego ciężaru atomowego i średniej liczby porządkowej tego chondrytu. Do przeprowadzenia obliczeń koniecznym było wykorzystanie także wyników Jarosewicha (1990) dotyczących średniej zawartości trzech brakujących pierwiastków: krzemu, siarki oraz fosforu, pierwiastków obecnych w składzie Viênciasi, a nieobecnych w wynikach Keila i współpr. (2015). Przyjęto, że zawartość: Si, S oraz P jest w Viênciasi taka sama jak średnia w grupie LL3, tj. w tej samej co Vicência grupie chondrytów, według stanu wiedzy na rok 1990.

Dane zebrane przez Hutchisona (2004) i Jarosewicha (1990) o średniej zawartości pierwiastków i tlenków w chondrytach LL, L, H, L/LL i H/L posłużyły do określenia średniego ciężaru atomowego poszczególnych grup chondrytów zwyczajnych. Wyniki uzyskane przez Keila i in. (2015) za pomocą spektroskopii mössbauerskiej posłużyły do określenia zawartości troilitu.

W niniejszej pracy średni ciężar atomowy i średnia masa atomowa są traktowane jako synonimy i są wyrażane jako wielkość bezwymiarowa.

Wyniki

W celu określenia wartości A_{mean} , Z_{mean} i A_{mean}/Z_{mean} wykorzystano następujące zależności opierając się na średnim składzie pierwiastkowym meteorytu:

$$A_{mean} = \sum wi / \sum (wi/Ai), \quad (1)$$

$$Z_{mean} = \sum wi / \sum (wi/Zi), \quad (2)$$

$$A_{mean}/Z_{mean} = \sum (wi/Zi) / \sum (wi/Ai), \quad (3)$$

gdzie wi (% wagowy) to część wagi meteorytu pochodząca od i -go pierwiastka tworzącego chondryt, Ai to ciężar atomowy/masa atomowa i -go pierwiastka, a Zi to liczba porządkowa i -go pierwiastka. Średni ciężar atomowy pierwiastków Ai , oraz A_{mean} meteorytów jest wielkością bezwymiarową, podobnie jak względna

masa atomowa pierwiastków. Bezwymiarowe są także liczby porządkowe Z_i oraz Z_{mean} .

Badania materii planetarnej i materii Księżyca umożliwiły autorowi odkrycie kilku ważnych zależności pomiędzy średnim ciężarem atomowym (A_{mean} , A) i innymi właściwościami fizycznymi (Szurgot 2015a–e). Są one zdaniem autora bardzo użyteczne dla badań materii meteorytów. Umożliwiają określenie średniego ciężaru atomowego A_{mean} meteorytu w sytuacji, gdy nie jest znany średni skład chemiczny meteorytu. Umożliwiają także przewidywanie wartości A_{mean} lub dokonanie weryfikacji wartości A_{mean} .

Pierwszy związek to zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} oraz stosunkiem atomowym Fe/Si dla chondrytów zwyczajnych: LL, L i H (Szurgot 2015c, d, e). Zależność tą opisuje równanie:

$$A_{mean} = (5,72 \pm 0,52) \cdot (Fe/Si)_{at} + (20,25 \pm 0,34), \quad (4)$$

dla którego współczynnik korelacji $R^2 = 0,996$, a średni błąd kwadratowy $RSME = 0,12$.

Najnowsze wyniki autora dotyczące badań hiszpańskich meteorytów zwyczajnych pokazały, że zależność $A_{mean}(Fe/Si)$ trochę lepiej opisuje równanie:

$$A_{mean} = (6,25 \pm 0,16) \cdot (Fe/Si)_{at} + (20,19 \pm 0,11), \quad (5)$$

dla którego współczynnik korelacji $R^2 = 0,998$, a średni błąd kwadratowy $RSME = 0,05$ (Szurgot 2018). Oba równania (4) i (5) reprezentują ten sam związek i prowadzą do porównywalnych wartości A_{mean} , ale wartości $A_{mean}(Fe/Si)$ dla meteorytów hiszpańskich nieco precyzyjniej przewiduje równanie (5).

Drugi związek to zależność średniego ciężaru atomowego A_{mean} od gęstości niesprężonej planet $d(g/cm^3)$, który jest wyrażony równaniem:

$$A_{mean} = (7,51 \pm 0,13) \cdot d + (-2,74 \pm 0,55), \quad (6)$$

dla którego współczynnik korelacji $R^2 = 0,99$, a średni błąd kwadratowy $RMSE = 0,54$ (Szurgot 2015a, b, c). Dla meteorytów gęstość niesprężona to gęstość ziaren w warunkach normalnych. Równanie (6) pozwala określić A_{mean} znając gęstość ziaren d .

Współzależność A_{mean} i d prowadzi do innego ważnego związku, który jest wyrażony równaniem:

$$d = (0,133 \pm 0,002) \cdot A_{mean} + (0,37 \pm 0,07), \quad (7)$$

dla którego średni błąd kwadratowy wynosi $RMSE = 0,07$ (Szurgot 2015a, b, c). Stosując równanie (7) można określić gęstość ziaren d , oznaczoną także jako d_{grain} i d_{gr} w dalszej części pracy, wykorzystując uprzednio określoną wartość A_{mean} .

Trzeci związek odkryty przez autora (Szurgot 2016a, d) to zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} i logarytmem podatności magnetycznej meteorytu $\log\chi$, który jest wyrażony równaniem:

$$A_{mean} = 1,49 \cdot \log\chi + 16,6, \quad (8)$$

dla którego współczynnik korelacji wynosi $R^2 = 0,95$, a średni błąd kwadratowy wynosi $RMSE = 0,24$. Otrzymane z równania (8) wartości A_{mean} dotyczą składu meteorytów bez H_2O , ponieważ dla nich zależność $A_{mean}(\log\chi)$ została wyznaczona. Poprawne wartości A_{mean} będą przewidywane także przy małej zawartości H_2O w składzie skały meteorytu.

Podatność magnetyczna jest ważną wielkością fizyczną, ostatnio często wykorzystywaną do klasyfikacji meteorytów, także chondrytów (Rochette i in. 2003, Rochette i in. 2008, Rochette i in. 2012, Keil i in. 2015, Przylibski 2016, Bartoschewitz i in. 2017). Współzależność pomiędzy A_{mean} i $\log\chi$ można także zapisać przez związek, wyrażony równaniem:

$$\log\chi = 0,61 \cdot A_{mean} - 9,7, \quad (9)$$

który umożliwia przewidywanie wartości $\log\chi$ w oparciu o znajomość A_{mean} (Szurgot 2016a, d). Średni błąd kwadratowy dla $\log\chi$ określonego z równania (9) wynosi $RMSE = 0,16$, a współczynnik korelacji wynosi $0,95$.

Tabela 1 prezentuje skład pierwiastkowy, wartości w_i (% wagowe), wartości A_{mean} , Z_{mean} i A_{mean}/Z_{mean} obliczone dla materii tego chondrytu oraz jego krzemianów i metalu z wykorzystaniem równań (1)–(3) oraz dane eksperymentalne o średnim składzie pierwiastkowym meteorytu Vicência (Keil i in. 2015). W tabeli 1 prezentowane są także dane eksperymentalne o gęstości ziaren d_{grain} (Keil i in. 2015), logarytmie podatności magnetycznej $\log\chi$ (Keil i in. 2015), oraz obliczone przez autora wartości A_{mean} z równań (4)–(6) i (8) oraz wartości stosunku atomowego Fe/Si .

Oprócz zależności (1)–(8), (11), (17) wcześniej wyprowadzonych, zweryfikowanych i używanych przez autora, pewne nowe zależności (równania (12), (18)–(19)) zostały wyprowadzone i wykorzystane w niniejszej pracy, a obliczenia dokonane z ich wykorzystaniem także pokazano w tabeli 1.

Ponieważ wartości $A_{mean}(\text{skład chemiczny})$, $A_{mean}(Fe/Si)$, $A_{mean}(d_{grain})$ oraz $A_{mean}(\log\chi)$ są bliskie jedna drugiej (tab. 1), to:

$$A_{mean}(\text{skład chemiczny}) \approx A_{mean}(Fe/Si) \approx A_{mean}(d_{grain}) \approx A_{mean}(\log\chi), \quad (10)$$

a każda z nich jest obciążona pewnym błędem eksperymentalnym, to dla zmniejszenia niepewności w przewidywaniu A_{mean} można użyć średnich arytmetycznych z dwu, lub trzech zależności $A_{mean}(\text{właściwość fizyczna})$.

Z równań (4), (6) i (8) wynika następująca zależność (równanie (11)):

$$A_{mean}(d_{grain}, \chi, Fe/Si) = (A_{mean}(d_{grain}) + A_{mean}(\log\chi) + A_{mean}(Fe/Si))/3 = (7,51 \cdot d_{grain} + 1,49 \cdot \log\chi + 5,72 \cdot (Fe/Si))/3 + 11,37, \quad (11)$$

A z równań (5), (6) i (8) zależność:

$$A_{mean}(d_{grain}, \chi, Fe/Si) = (A_{mean}(d_{grain}) + A_{mean}(\log\chi) + A_{mean}(Fe/Si))/3 = (7,51 \cdot d_{grain} + 1,49 \cdot \log\chi + 6,25 \cdot (Fe/Si))/3 + 11,35. \quad (12)$$

Tabela 1. Średnia zawartość pierwiastków w chondrycie LL3.2 Vicência wg. danych Keila i współpr. (2015), uzupełniona o zawartość Si, S oraz P wg. danych Jarosewicha (1990) dla grupy LL3, gęstość ziaren d_{grain} (Keil i in. 2015), logarytm podatności magnetycznej $\log\chi$ (Keil i in. 2015) oraz wartości A_{mean} , Z_{mean} , A_{mean}/Z_{mean} chondrytu Vicência i gęstości ziaren tego chondrytu przewidywane przez zależności $d_{gr}(A)$ oraz $d_{gr}(Fe/Si)$.

Pierwiastek	Ai	Zi	Vicência	Krzemiany	Metal
			wi (% wag.)	wi (% wag.)	wi (% wag.)
Si	28,086	14	18,91	18,91	–
Ti	47,867	22	0,065	0,065	–
Al	26,982	13	1,11	1,11	–
Cr	51,996	24	0,416	–	–
Fe	55,845	26	18,5	11,95 ^	2,43
Mn	54,938	25	0,251	0,251	–
Mg	24,305	12	14,6	14,6	–
Ca	40,078	20	1,31	1,12 ^	–
Na	22,99	11	0,696	0,696	–
K	39,098	19	0,094	0,094	–
P	30,974	15	0,10	–	–
Ni	58,693	28	0,92	–	0,92
Co	58,933	27	0,043	–	0,043
S	32,066	16	2,38	–	–
O	16	8	40,60	40,14 ^	–
Σwi			100	88,936	3,393
$Fetot$			18,5	11,95	2,43
$\Sigma(wi/Ai)$			4,3657	4,1044	0,0599
$\Sigma(wi/Zi)$			8,7932	8,2670	0,1279
A_{mean} (skład chemiczny)			22,91	21,67	56,63
Z_{mean}			11,37	10,76	26,53
A_{mean}/Z_{mean}			2,015	2,014	2,135
Fe/Si			0,492	0,318	–
$A(Fe/Si)^{***}$			23,06	22,07	–
$A(Fe/Si)^{****}$			23,26	22,18	–
d_{grain}			3,28	–	–
$A(d_{grain})$			21,89	21,67 (3.25) 22.19 (3.32)	–
$\log\chi$			4,30	–	–
$A(\log\chi)$			23,01	–	–
$A(d_{gr}, \chi, Fe/Si)^*$			22,65±0,66	–	–
$A(d_{gr}, \chi, Fe/Si)^{**}$			22,72±0,73	–	–
$d_{gr}(A)$			3,42	3,25	7,90
$d_{gr}(Fe/Si)^{\#}$			3,47	3,32	–
$d_{gr}(Fe/Si)^{\#\#}$			3,49	3,35	–

Σ = suma. Wartości obliczone z równania: *(11), **(12), *** (4), **** (5), # (19), ## (17). Dla $Fetot = 17,0\%$ wag. A_{mean} (skład chemiczny) = 22,54, dla $Fetot = 20\%$ wag. A_{mean} (skład chemiczny) = 23,31. ^Wartości skorygowane: i) dla Fe uwzględniono Fe zawarte w metalu, troilicie i chromicie, ii) dla O uwzględniono tlen zawarty w chromicie i withlockicie, iii) dla Ca uwzględniono wapń zawarty w withlockicie.

Dane literaturowe o zawartości pierwiastków w chondrycie Vicência prezentowane w tabeli 1 otrzymano stosując trzy techniki doświadczane: i) ICP-OES dla pierwiastków: Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K, Ni, oraz Co; ii) INAA dla pierwiastków: Cr, Fe, Mn, Ca, Na, K, Ni, oraz Co (Keil i in. 2015). iii) Trzecia technika to klasyczna analiza chemiczna, dane której umożliwiły uzupełnienie zawartości trzech pierwiastków: Si, S oraz P, dla których przyjęto, że w Vicênciasi jest obecna taka ich zawartość jak średnia w chondrytach LL3 (Jarosewich 1990). W przypadku pierwiastków, których zawartość określono dwoma technikami: ICP-OES oraz INAA, tj. Fe, Mn, Ca, K, Ni oraz Co (Keil i in. 2015), w tabeli 1 zamieszczono ich średnią arytmetyczną. Dla żelaza (Fe) dało to wartość średnią 18,5% wag. wynikającą z pomiaru techniką ICP-OES (17,0% wag.) oraz z pomiaru techniką INAA (20,0% wag.). Zawartość tlenu (O) określono przez uzupełnienie sumy pozostałych pierwiastków do 100%.

Tabela 1 pokazuje, że średni ciężar atomowy meteorytu Vicência określony z jego składu pierwiastkowego wynosi $A_{mean}(skład\ chemiczny) = 22,91$. Gęstość ziaren daje wartość znacznie zaniżoną ($A(dgrain) = 21,89$), natomiast podatność magnetyczna oraz stosunek atomowy Fe/Si prowadzą do zbliżonych do $A_{mean}(skład\ chemiczny)$ wartości ciężaru atomowego meteorytu Vicência: $A(log\chi) = 23,01$; $A(Fe/Si) = 23,06$ (z równ. (4)) oraz $A(Fe/Si) = 23,26$ (z równ. (5)). Przewidywane wartości A_{mean} meteorytu Vicência w oparciu o trzy właściwości fizyczne meteorytu dają także całkiem realne dane, zbliżone do wartości $A_{mean}(skład\ chemiczny)$. Równanie (11) przewiduje wartość $A(Fe/Si, dgr, \chi) = 22,65 \pm 0,66$, a równanie (12) wartość: $A(Fe/Si, dgr, \chi) = 22,72 \pm 0,73$. Zaniżona wartość A_{mean} wskazywana przez zależność $A(dgrain)$ jest skutkiem małej wartości gęstości ziaren zmierzonej dla meteorytu Vicência ($dgr = 3,28\text{ g/cm}^3$, Keil i in. 2015).

Tabela 2 zawiera dane określone przez autora (Szurgot 2016a, d) o średnich wartościach A_{mean} dla grup LL, L, H, L/LL i H/L chondrytów zwyczajnych. Dane dotyczą spadków, a w średnim składzie chemicznym grup meteorytów wyszczególnionych w tabeli 2 zawarta jest H_2O , zgodnie z danymi chemicznymi Jarosewicha (1990). Tabela 3 zawiera dane autora (Szurgot 2016a, d) określone

Tabela 2. Średnie wartości A_{mean} dla grup chondrytów zwyczajnych (Szurgot 2016a, d).

Grupa	$A_{mean}(skład\ chem.)$	$A_{mean}(Fe/Si)$	$A_{mean}(dgrain)$
	(równ. (1))	(równ. (4))	(równ. (6))
LL	22,90*	23,22*	23,70 [#]
L/LL	23,34±0,19	23,33	23,62 [#]
L	23,67*	23,65*	24,15 [#]
H/L	24,32±0,07	24,40	24,60 [#]
H	24,63*	24,87*	25,12 [#]

* A_{mean} obliczone dla średniego składu chemicznego spadków chondrytów LL, L, oraz H wg danych Jarosewicha (1990), [#] A_{mean} dla spadków LL, L, i H obliczone z zależności $A_{mean}(dgrain)$ z wykorzystaniem danych $dgrain$ określonych przez Mackego (2010).

Tabela 3. Średnie wartości stosunku atomowego Fe/Si , gęstości ziaren d_{grain} , oraz $\log\chi$ dla spadków różnych grup chondrytów zwyczajnych (Szurgot 2016a, d).

Grupa	Fe/Si	d_{grain}	$\log\chi$
LL	0,520*	3,52 (Macke 2010) 3,54 (Consolmagno i in. 2008)	4,11±0,30 (Macke 2010)
L/LL	0,538±0,034	3,51±0,03	4,66±0,21
L	0,594*	3,58 (Macke 2010) 3,56 (Consolmagno i in. 2008)	4,87±0,10 (Rochette i in. 2003)
H/L	0,726±0,041	3,64±0,09	5,01±0,10 (Macke 2010) 4,98±0,01
H	0,807*	3,71 (Macke 2010) 3,72 (Consolmagno i in. 2008)	5,32±0,10 (Rochette i in. 2003)

* Dla średniego składu chemicznego spadków chondrytów LL, L, oraz H wg. danych Jarosewicha (1990), $d_{grain}(g/cm^3)$ oraz $\log\chi$ spadków chondrytów LL, L, i H (Macke 2010, Consolmagno i in. 2008). Do obliczeń wykorzystano wartości średnie: d_{grain} oraz $\log\chi$ chondrytów L/LL i chondrytów H/L oraz wartości d_{grain} i $\log\chi$ indywidualnych meteoroidów (Rochette i in. 2003).

w oparciu o dane literaturowe dotyczące średniej wartości stosunku atomowego Fe/Si , gęstości ziaren d_{grain} oraz logarytmu podatności magnetycznej $\log\chi$ grup chondrytów zwyczajnych reprezentowanych przez spadki.

Zgodnie z analizą autora (Szurgot 2016a, d) dane zawarte w tabelach 2 i 3 pokazują, że A_{mean} , stosunek Fe/Si , d_{grain} oraz $\log\chi$ spełniają następujące nierówności:

$$A_{meanLL} < A_{meanL/LL} < A_{meanL} < A_{meanH/L} < A_{meanH}, \quad (13)$$

$$(Fe/Si)_{LL} < (Fe/Si)_{L/LL} < (Fe/Si)_L < (Fe/Si)_{H/L} < (Fe/Si)_H, \quad (14)$$

$$d_{grainLL} \approx d_{grainL/LL} < d_{grainL} < d_{grainH/L} < d_{grainH}, \quad (15)$$

$$\log\chi_{LL} < \log\chi_{L/LL} < \log\chi_L < \log\chi_{H/L} < \log\chi_H. \quad (16)$$

Tabele 2 i 3 oraz nierówności (13)–(16) pokazują, że średnie wartości A_{mean} , Fe/Si , d_{grain} i $\log\chi$ dla chondrytów grupy przejściowej L/LL są pomiędzy wartościami uzyskanymi dla chondrytów L i LL, a dla grupy przejściowej chondrytów H/L są pomiędzy wartościami charakterystycznymi dla chondrytów H i L (Szurgot 2016a, d). Oznacza to, że A_{mean} oraz Fe/Si są wielkościami użytecznymi dla klasyfikacji chondrytów zwyczajnych. Dane w tabeli 3 ujawniają, że średnie gęstości ziaren chondrytów LL i L/LL są porównywalne, natomiast gęstość ziaren chondrytów grupy H/L pozwala na ich rozróżnienie zarówno od chondrytów L, jak i chondrytów H (Szurgot 2016a, d).

W celu porównania wartości A_{mean} chondrytu Vicência i średnich wartości A_{mean} dla różnych grup chondrytów zwyczajnych zestawiono dane A_{mean} w tabeli 4.

Dane z tabel 1 i 4 pokazują, że średni ciężar atomowy meteoroidu Vicência jest oczekiwany dla chondrytu LL. Średni skład pierwiastkowy meteoroidu prowadzi do wartości $A_{mean} = 22,91$, przy czym możliwy zakres A_{mean} dla różnych wartości

Tabela 4. Średni ciężar atomowy A_{mean} , stosunek Fe/Si , d_{grain} i $log\chi$ różnych grup chondrytów zwyczajnych (Szurgot 2016a, d) oraz chondrytu Vicência.

Meteoryt <i>A_{mean}</i>	Vicência (LL3.2)	LL	L/LL	L	H/L	H
<i>A_{mean}</i> (składchemiczny)	22,91* [22,55–23,32]	22,90 23,03 [^] 23,36 [^]	23,34	23,67	24,32	24,63
<i>A_{mean}</i> (Fe/Si)	23,06 [22,84–23,64]	23,22	23,33	23,65	24,40	24,87
<i>A_{mean}</i> (d_{grain})	21,89	23,70	23,62	24,15	24,60	25,12
<i>A_{mean}</i> ($log\chi$)	23,01	22,72	23,54	23,86	24,06	24,53
Fe/Si	0,492 [0,452–0,552]	0,520	0,538	0,594	0,726	0,807
d_{grain} (g/cm ³)	3,28**	3,52–3,54	3,51	3,56–3,58	3,64	3,71–3,72
d_{grain} (<i>A_{mean}</i>)	3,42	3,42–3,48	3,47	3,52	3,60	3,65
d_{grain} (Fe/Si) [#]	3,47	3,51 ^{###}	3,52	3,56 ^{###}	3,67	3,73 ^{###}
d_{grain} (Fe/Si) ^{##}	3,49	3,49	3,51	3,55	3,66	3,73
$log\chi$	4,30**	4,11	4,66	4,87	5,01	5,32

* Wartość dla składu chemicznego meteorytu Vicência nie zawierającego H₂O, dla $Fetot = 18,5\%$ wagowy. W nawiasach kwadratowych [] podano zakresy wartości. **Wartości d_{gr} oraz $log\chi$ określone przez Keila i współpracowników (2015). ###Wartość A_{mean} dla składu chemicznego chondrytów grupy LL: [^]z H₂O, [^] bez H₂O, według nowych danych Szurgota (2016b). #Wyznaczone z równania (17), ##z równania (19). ###Określone przez Szurgota (2017f). $d_{grain}(A_{mean})$ wyznaczono z równania (7). Dane o wartościach $d_{grain}(g/cm^3)$ oraz $log\chi$ dla spadków chondrytów LL, L, H, L/LL oraz H/L wzięto z tabeli 3, które są oparte o wyniki Mackego (2010), Consolmagno i in. (2008), oraz Rochette i in. (2003) zebrane i zanalizowane przez autora.

całkowitej zawartości żelaza $Fetot$ to: 22,54–23,31. Zależność $A_{mean}(Fe/Si)$ (równ. (4)) daje wartość $A_{mean} = 23,06$ ($Fe/Si = 0,492$).

Wykorzystując zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym i gęstością ziaren (równ. (6)) (Szurgot 2015a, b, c) uzyskuje się wartość $A_{mean} = 21,89$ ($d_{gr} = 3,28$ g/cm³, Keil i in. 2015), a wykorzystanie zależności pomiędzy A_{mean} i podatnością magnetyczną (równ. (8)) (Szurgot 2016a, d) daje wartość $A_{mean} = 23,01$ ($log\chi = 4,30$, Keil i in. 2015). Skład pierwiastkowy, stosunek atomowy Fe/Si , gęstość ziaren oraz podatność magnetyczna wskazują, że meteoryt Vicência jest chondrytem LL.

Stosunek atomowy Fe/Si meteorytu Vicência (0,492) użyty do obliczeń A_{mean} jest wartością wynikającą z uśrednienia dwu wartości całkowitej zawartości żelaza $Fetot$: 17,0% wagowych (metoda ICP-OES) oraz 20,0% wagowych (metoda INAA). Dla tej samej zawartości krzemu (18,91% wag.) wynikają następujące dane dla stosunku Fe/S : 0,452 dla $Fetot = 17,0\%$ wag. oraz 0,552 dla $Fetot = 20,0\%$ wag., które zgodnie z równaniem (4), prowadzą do zakresu wartości: $A_{mean}(Fe/Si) = 22,84–23,43$, a równanie (5) do zakresu $A_{mean}(Fe/Si)$: 23,02–23,64. Te dane świadczą o przynależności chondrytu Vicência do grupy LL, chociaż gór-

ne wartości zakresu A_{mean} : 23,43 oraz 23,64 nie wykluczają grupy przejściowej L/LL lub nawet grupy L.

Vicência ma średni ciężar atomowy A_{mean} bliski chondrytom LL ($A_{meanLL} = 22,90$, Szurgot 2016a; $A_{meanLL} = 23,03$ – $23,36$, Szurgot 2016b). Podatność magnetyczna Vicênciasi wskazuje grupę LL ($\log\chi_{LL} = 4,11 \pm 0,30$, Macke 2010).

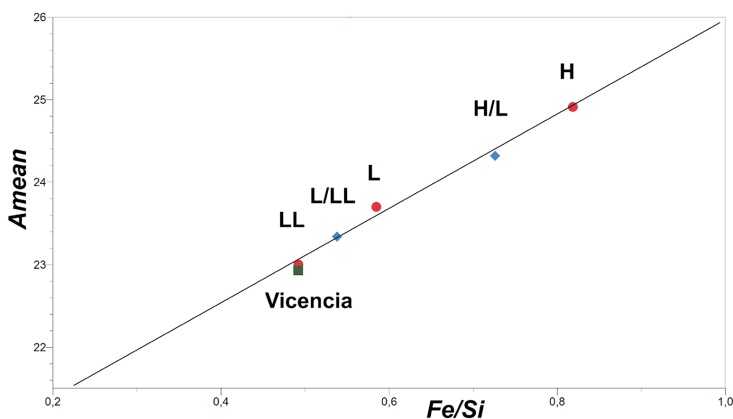
Niska gęstość ziaren Vicênciasi wskazuje także na najniższą grupę spośród chondrytów zwyczajnych, tj. na grupę LL ($d_{grainLL} = 3.52 \text{ g/cm}^3$, Macke 2010).

Dane prezentowane w tabeli 2 oparto o analizę wartości A_{mean} wyznaczonych dla grupy siedmiu L/LL chondrytów, trzech H/L chondrytów. Dla grup LL, L oraz H liczebność populacji meteorytów była dużo większa i obejmowała tyle meteorytów dla ilu dokonano pomiarów składu chemicznego i gęstości ziaren (Jarosewich 1990, Macke 2010), a było to przynajmniej kilkanaście chondrytów dla każdej z tych grup.

Średnia liczba porządkowa Z_{mean} oraz stosunek A_{mean}/Z_{mean} dla badanego chondrytu Vicênciasi zostały również określone (tab. 1). Otrzymano dla Vicênciasi następujące wartości: $Z_{mean} = 11,37$ oraz $A_{mean}/Z_{mean} = 2,015$. Niżej zaprezentowano wartości stosunku A_{mean}/Z_{mean} uzyskane przez autora dla chondrytów grup LL, L oraz H. Dla chondrytów grupy LL otrzymano: 2,022 dla Sieny (LL5), 2,019–2,020 dla Hautes Fagnes (LL5), 2,019 dla NWA 7915 (LL5) (Szurgot 2016d), 2,027 dla chondrytu Chelyabinsk (LL5), 2,025 dla Olivenzy (LL5), 2,021 dla chondrytu Stubenberg (LL6) (Szurgot 2017d), oraz 2,026 dla chondrytu Ensisheim (LL6) (Szurgot 2017e). Stosunek A_{mean}/Z_{mean} Vicênciasi jest zbliżony do wartości A_{mean}/Z_{mean} uzyskanych dla chondrytu Sołtmany (L6): 2,022, chondrytu Braunschweig (L6): 2,021 (Szurgot i in. 2017) oraz jest zbliżony do chondrytów grupy H4-5: 2,026 dla meteorytu Košice, 2,030 dla meteorytu Pułtusk.

Powyższe wyniki wskazują, że wartość stosunku A_{mean}/Z_{mean} jest prawie jednakowa dla różnych grup chondrytów zwyczajnych. Dla siedmiu chondrytów grupy LL mieści się w zakresie 2,015–2,027, dla dwu przedstawicieli grupy L wynosi 2,021–2,022, dla dwu przedstawicieli grupy H waha się w granicach 2,026–2,030. Oznacza to, że zakres wartości stosunku A_{mean}/Z_{mean} dla trzech grup chondrytów zwyczajnych jest zawarty w przedziale 2,015–2,030, a chondryty H wykazują nieco większy stosunek A_{mean}/Z_{mean} niż grupy L i LL.

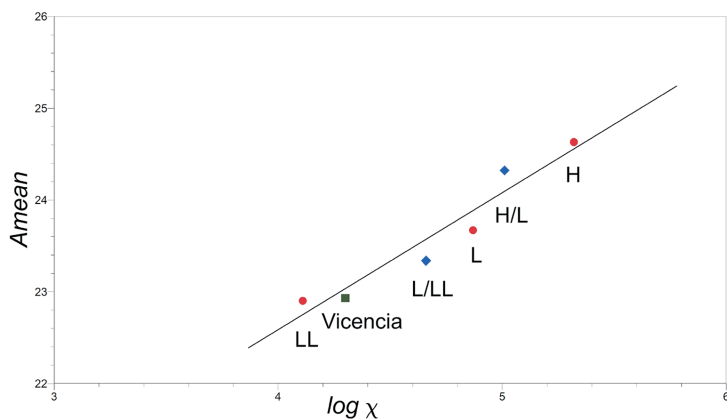
Rysunek 1 prezentuje zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} a stosunkiem atomowym Fe/Si dla grup chondrytów zwyczajnych: LL, L/LL, H/L, H oraz chondrytu Vicênciasi. Wartości A_{mean} i Fe/Si dla chondrytów LL, L oraz H pochodzą z wcześniejszej pracy autora (Szurgot 2015c), a wartości A_{mean} i Fe/Si z nowszej pracy autora (Szurgot 2016a). Zależność $A_{mean}(Fe/Si)$ opisuje równanie (4). Wartości A_{mean} prezentowane tutaj wynikają ze średniego składu chemicznego chondrytów i zostały wyznaczone z równania (1). Można zauważyć, że zależność $A_{mean}(Fe/Si)$ wyrażona przez równanie (4) dobrze opisuje materię całej skały meteorytów (rys. 1). Prezentowane dane wskazują, że chondryt Vicênciasi należy do grupy LL.



Rys. 1. Zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} oraz stosunkiem atomowym Fe/Si dla chondrytów zwyczajnych LL, L/LL, L, H/L, H oraz chondrytu Vicência. Wartość A_{mean} dla skały meteorytu Vicência przez zielony kwadrat została obliczona dla składu bez H_2O .

Równanie (8) i rysunek 2 prezentują zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} i logarytmem podatności magnetycznej meteorytu $\log \chi$ (Szurgot 2016a, d). Wykres ten pokazuje, że równanie (8) prowadzi do realnej wartości A_{mean} dla meteorytu Vicência. Widać, że meteoryt Vicência należy do grupy LL chondrytów zwyczajnych.

W 2016 roku autor ujawnił dla chondrytów zwyczajnych wpływ typu petrograficznego na wartość średniego ciężaru atomowego A_{mean} chondrytu (Szurgot 2016b). Pokazał, że względnie mało zmetamorfizowane ciepłnie chondryty zwyczajne, tj. chondryty typu 3, wykazują mniejsze wartości A_{mean} niż chondryty poddane metamorfizmowi cieplnemu, tj. chondryty należące do typów 4, 5 oraz 6, a najsilniejszy wpływ widać dla grupy H. Jednak w grupie LL wartości A_{mean} dla składu meteorytu bez H_2O w różnych typach petrologicznych są prawie jednako-



Rys. 2. Zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} oraz logarytmem podatności magnetycznej chondrytów zwyczajnych LL, L/LL, L, H/L i H (Szurgot 2016a, d) oraz chondrytu Vicência. Wartości A_{mean} obliczono dla składu chemicznego meteorytów bez H_2O .

we. Dopiero po uwzględnieniu wody typ 3 ma wyraźnie mniejszą wartość A_{mean} niż wartości A_{mean} w typach 4–6 meteorytów zmetamorfizowanych cieplnie. Ponieważ dane literaturowe składu chemicznego meteorytu Vicência (Keil i in. 2015) użyte w obliczeniach A_{mean} (skład chemiczny) nie uwzględniały zawartości wody, to na tym etapie badań, weryfikacja typu petrologicznego chondrytu Vicência nie była możliwa.

Znajomość gęstości ziaren meteorytów, gęstości chondr w chondrytach, oraz gęstości niesprężonych planet i ich składników: jąder, płaszczy oraz skorup jest konieczna dla badań materii pozaziemskiej. Odkryta przez autora współzależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} i gęstością d , a wyrażona przez równania (6) i (7) (Szurgot 2015a, b, c) jest niezwykle cennym i przydatnym narzędziem badań materii pozaziemskiej, służącym do analizy zarówno średniego ciężaru atomowego jak i gęstości ziaren meteorytów i planet.

Zgodnie z danymi eksperymentalnymi Keila i współpracowników (2015) gęstość ziaren chondrytu Vicência wynosi $3,28 \text{ g/cm}^3$. Jest to jak na chondryt LL, niska gęstość ziaren. Taka gęstość prowadzi do zaniżonej wartości średniego ciężaru atomowego przewidywanej przez zależność A_{mean} (d_{gr}) (równanie (6) (21,89, tab. 1) w stosunku do wartości wyznaczonej przez skład pierwiastkowy meteorytu Vicência (A_{mean} (skład chemiczny) = 22,91, tab. 1). Wydaje się naturalnym, aby zweryfikować wartość gęstości ziaren chondrytu Vicência.

Stosując równanie (7) można określić gęstość ziaren wykorzystując uprzednio określoną wartość A_{mean} . Dla wyznaczonego ciężaru atomowego meteorytu Vicência, jego krzemianów oraz części metalicznej (Fe, Ni, Co) meteorytu, tj. dla wartości: 22,91, 21,67 oraz 56,63 równanie (7) przewiduje gęstość ziaren chondrytu Vicência: $3,42 \text{ g/cm}^3$, gęstość krzemianów tego meteorytu: $3,25 \text{ g/cm}^3$, oraz gęstość metalu: $7,90 \text{ g/cm}^3$ (tab. 1, rys. 3). Są to realne wartości gęstości. Dane te wskazują, że rzeczywista gęstość ziaren meteorytu Vicência jest wyższa niż ta dotychczas zmierzona i powinna być ponownie zweryfikowana eksperymentalnie.

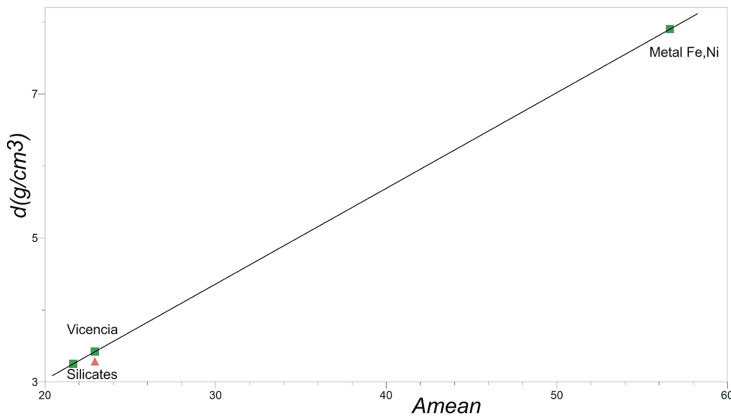
Nie tylko zależność gęstości od średniego ciężaru atomowego $d(A_{mean})$ umożliwia przewidywanie i/lub weryfikację gęstości ziaren meteorytu i gęstości niesprężonej planet. Istnieje związek $d(Fe/Si)$, odkryty przez autora pomiędzy gęstością materii pozaziemskiej i stosunkiem atomowym Fe/Si (Szurgot 2017f). Związek ten jest wyrażony przez równanie:

$$d \text{ (g/cm}^3\text{)} = 0,765 \cdot Fe/Si + 3,11, \quad (17)$$

dla którego niepewność gęstości jest rzędu $0,04\text{--}0,09 \text{ g/cm}^3$.

Stosując związek $d(Fe/Si)$ (równ. (17)) otrzymano realne wartości dla gęstości niesprężonej Ziemi ($3,95 \text{ g/cm}^3$), Wenus ($3,87 \text{ g/cm}^3$), Marsa ($3,73 \text{ g/cm}^3$) i Księżycy ($3,27 \text{ g/cm}^3$) oraz dla gęstości ziaren grup chondrytów zwyczajnych H ($3,73 \text{ g/cm}^3$), L ($3,56 \text{ g/cm}^3$), LL ($3,51 \text{ g/cm}^3$), także dla indywidualnych chondrytów: chondrytu LL6 Stubenberg ($3,53 \text{ g/cm}^3$) (Szurgot 2017d, f) oraz dla chondrytu L6 Sołtmany ($3,56 \text{ g/cm}^3$).

Wyżej prezentowane dane wskazują, że zależność wyrażona przez równanie (17) prowadzi do poprawnych przewidywań gęstości zarówno dla meteorytów, jak



Rys. 3. Zależność pomiędzy gęstością ziaren d i średnim ciężarem atomowym A_{mean} wyrażona przez zależność $d(A_{mean})$. Zielone kwadraty wskazują przewidywane przez równanie (7) gęstości ziaren: i) dla całej skały meteorytu Vicência, dla ii) jego krzemianów, oraz iii) dla metalu (Fe, Ni, Co) Vicência. Czerwony trójkąt wskazuje eksperymentalną wartość gęstości chondrytu Vicência. Na osi odciętych występują wartości A_{mean} (skład pierwiastkowy) wyznaczone ze składu pierwiastkowego.

i planet: Ziemi, Wenus, Marsa oraz Księżyca. Wykorzystanie wartości stosunku atomowego Fe/Si : 0,492 dla meteorytu Vicência oraz 0,318 dla krzemianów tego chondrytu (tab. 1) prowadzi do wartości gęstości ziaren $3,49 \text{ g/cm}^3$ dla Vicência i gęstości jej krzemianów: $3,35 \text{ g/cm}^3$ (tab. 1, rys. 4). Wyniki te potwierdzają, że gęstość ziaren meteorytu Vicência powinna być ponownie zweryfikowana eksperymentalnie.

Zależność $d(Fe/Si)$ została odkryta w oparciu o eksperymentalne dane literaturowe, ale wynika ona także z zależności wcześniej odkrytych przez autora. Podstawienie zależności $A_{mean}(Fe/Si)$ (równ. (4)) do zależności $d(A_{mean})$ (równ. (7)) prowadzi do zależności:

$$d(\text{g/cm}^3) = (0,76 \pm 0,08) \cdot Fe/Si + (3,06 \pm 0,15). \quad (18)$$

Ta teoretycznie wyprowadzona zależność $d(Fe/Si)$ jest, w granicach błędu, zgodna z zależnością opisaną równaniem (17), opartą o dane eksperymentalne.

Ponieważ hiszpańskie chondryty zwyczajne nieco lepiej opisuje równanie (5) niż równanie (4), to przynajmniej dla hiszpańskich meteorytów, zależność $d(Fe/Si)$ powinna być nieco zmodyfikowana. Podstawienie zależności $A_{mean}(Fe/Si)$ (równ. (5)) do zależności $d(A_{mean})$ (równ. (7)) prowadzi do zależności:

$$d(\text{g/cm}^3) = (0,83 \pm 0,03) \cdot Fe/Si + (3,06 \pm 0,12). \quad (19)$$

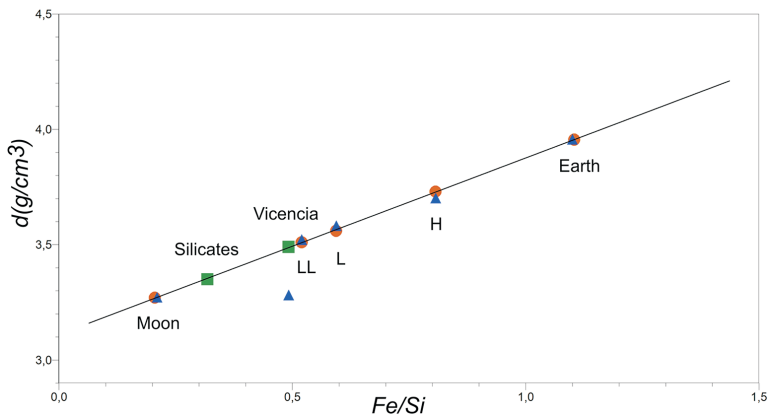
Zastosowanie równania (19) dla meteorytu Vicência prowadzi do wartości gęstości ziaren: $3,47 \text{ g/cm}^3$, oraz do gęstości ziaren jego krzemianów: $3,32 \text{ g/cm}^3$ (tab. 1). Są to porównywalne gęstości w stosunku do gęstości: $3,42 \text{ g/cm}^3$ (Vicência) i $3,25 \text{ g/cm}^3$ (krzemiany Vicência) otrzymanych wykorzystując równanie (7). Dla grup chondrytów zwyczajnych LL ($Fe/Si = 0,520$), L ($Fe/Si = 0,594$) oraz H ($Fe/Si = 0,807$, Szurgot 2016a) z równania (19) otrzymuje się wartości średniej gęstości ziaren: dla grupy LL: $3,49 \text{ g/cm}^3$, dla grupy L: $3,55 \text{ g/cm}^3$, oraz dla grupy

H: $3,73 \text{ g/cm}^3$, wartości bardzo zbliżone do tych przewidywanych przez równanie (17). Otrzymana dzięki równaniu (19) gęstość ziaren grupy LL jest o $0,02 \text{ g/cm}^3$ niższa, gęstość ziaren grupy L jest o $0,01 \text{ g/cm}^3$ niższa, a gęstość ziaren grupy H jest identyczna jak przewidywana przez równanie (17). Dane te wskazują, że oba równania (17) oraz (19) prowadzą to poprawnych i porównywalnych wartości gęstości ziaren dla chondrytów zwyczajnych.

W celu określenia zawartości siarki w chondrycie Vicência wykorzystano dane spektroskopii mössbauerowskiej otrzymane przez Keila i współpracowników (2015). Spektroskopia mössbauerowska ^{57}Fe jest ważnym i użytecznym narzędziem do badań meteorytów, umożliwiającym identyfikację minerałów zawierających żelazo, badań procesów wietrzenia oraz potencjalnym narzędziem do klasyfikacji meteorytów (Menzies i in. 2005, Gałązka-Friedman i in. 2014, Szlachta i in. 2014, Duda i in. 2017, Jakubowska i in. 2017, Gałązka-Friedman i in. 2017). Ponieważ spektroskopia mössbauerowska jest niezwykle czuła na oddziaływanie jądra z najbliższym otoczeniem jest techniką umożliwiającą jednoznaczną identyfikację związków żelaza i określenie procentowej zawartości tych związków w próbce (Jakubowska i in. 2017).

Analiza widma mössbauerowskiego chondrytu Vicência uzyskanego w temperaturze pokojowej pozwoliła Keilowi i jego współpracownikom (2015) na zidentyfikowanie następujących faz mineralnych zawierających żelazo: oliwinu, piroksenu, troilitu, kamacytu, tetrataenitu oraz antytaenitu.

Wielkość powierzchni ($A(\%)$) pod poszczególnymi podwidmami mössbauerowskimi jest proporcjonalna do liczby jąder żelaza ^{57}Fe znajdujących się w poszczególnych fazach mineralnych, i przy stałym składzie procentowym różnych izotopów



Rys. 4. Zależność pomiędzy gęstością ziaren d i stosunkiem atomowym Fe/Si wyrażona przez zależność $d(\text{Fe/Si})$. Zielone kwadraty wskazują przewidywane przez równanie (17) gęstości ziaren Vicência dla całej skały meteorytu i jego krzemianów. Czerwone koła to wyniki uzyskane z równ. (17) dla Ziemi, Księżyca i chondrytów zwyczajnych LL, L, oraz H (Szurgot 2017e). Niebieskie trójkąty wskazują eksperymentalne wartości gęstości ziaren chondrytów zwyczajnych (Macke 2010, Consolmagno i in. 2008) i teoretycznie przewidywane gęstości niesprężone Ziemi i Księżyca (Stacey 2005), a czerwone koła przewidywane przez równ. (17) wartości gęstości. Na osi odciętych występują wartości stosunku Fe/Si wyznaczone ze składu pierwiastkowego meteorytu Vicência, chondrytów LL, L, H, Ziemi oraz Księżyca (Szurgot 2017e).

żelaza znajdującym się w próbce meteorytu, może być interpretowana jako wielkość proporcjonalna do zawartości wszystkich jąder żelaza w danej fazie mineralnej (np. Szlachta i in. 2014). Należy pamiętać, że parametr mössbauerowski A wyraża „procent dopasowania”, a nie wartość modalną minerału w próbce wyrażoną w procentach wagowych.

Pomiary Keila i współpracowników (2015) wskazują na następującą zawartość jąder żelaza w minerałach meteorytu Vicência: 41% w oliwinie, 31% w piroksenie, 18% w troilicie, oraz 10% w kamacycie. Te dane dotyczą całej skały chondrytu. Dla części metalicznej otrzymano następującą zawartość jąder żelaza ^{57}Fe : 5% w oliwinie, 81% w kamacycie, 10% w tetrataenicie oraz 4% w antytaenicie (Keil i in. 2015).

Aby określić zawartość troilitu (FeS) w meteorycie Vicência wykorzystano następującą zależność wprowadzoną przez Menzies i współpracowników (2005):

$$\text{FeS}(\% \text{ wag.}) = A(\% \text{ mössb.}) \cdot \text{Fetot}(\% \text{ wag.}) / \text{Fe}(\text{FeS})(\% \text{ wag.}), \quad (20)$$

gdzie $\text{Fetot}(\% \text{ wag.})$ to całkowita zawartość żelaza w meteorycie, $\text{Fe}(\text{FeS})(\% \text{ wag.})$ to zawartość Fe w troilicie, A to wielkość powierzchni pod podwidmem troilitu $A(\% \text{ mössbauerowskie})$. Wartość $\text{Fe}(\text{FeS}) = 63,5\% = 0,635$.

Podstawienie do równ. (20) wartości: $A = 18\%$ (Keil i in. 2015), $\text{Fe}(\text{FeS}) = 63,5\%$ oraz $\text{Fetot} = 18,5\% \text{ wag.}$ (tab. 1) daje zawartość troilitu $\text{FeS}(\% \text{ wag.}) = 5,24\% \text{ wag.}$, co odpowiada zawartości siarki $S = 1,94\% \text{ wag.}$ w meteorycie Vicência, według danych mössbauerowskich. Podstawienie wartości: $\text{Fetot} = 17,0\% \text{ wag.}$ (wg. danych ICP-OES) oraz $\text{Fetot} = 20,0\% \text{ wag.}$ (wg. danych INAA) prowadzi do wartości: $\text{FeS}(\% \text{ wag.}) = 4,82\% \text{ wag.}$, (wg. ICP-OES) oraz $\text{FeS}(\% \text{ wag.}) = 5,67\% \text{ wag.}$, (wg. INAA), co odpowiada zakresowi zawartości siarki $S = 1,76\text{--}2,07\% \text{ wag.}$ Oznacza to średnią zawartość troilitu $\text{FeS} = 5,24 \pm 0,60\% \text{ wag.}$ i średnią zawartość siarki $S = 1,94 \pm 0,22\% \text{ wag.}$ w meteorycie Vicência według danych mössbauerowskich.

Dane te wskazują, że współczesna technika badawcza, którą jest spektroskopia mössbauerowska prowadzi do zawartości FeS oraz S , bliskich do tych, które uzyskuje się stosując klasyczną analizę chemiczną, a która dla średniej spadków chondrytów typu LL3 wskazuje: $\text{FeS} = 6,54 \pm 1,14\% \text{ wag.}$, $S = 2,38 \pm 0,42\% \text{ wag.}$ według danych Jarosewicha (1990).

Wyniki dla zawartości troilitu w chondrycie Vicência powinny być wiarygodne ponieważ wykorzystana do obliczeń zależność (20) została zweryfikowana przez Menzies i współpracowników (2005) dla szeregu niezrównoważonych chondrytów zwyczajnych (UOCs). Najlepszą zgodność otrzymano dla chondrytu Chainpur LL3.4, dla którego dane mössbauerowskie ujawniły zawartość troilitu: 6,2% wag., a dane uzyskane za pomocą klasycznej analizy chemicznej zawartość: 6,4% wag. (Jarosewicz 1990).

W tej samej pracy zanalizowano skład modalny chondrytów zwyczajnych niezrównoważonych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), także zawartość troilitu. Wyniki mössbauerowskie ujawniły w tych chondrytach zawartość FeS w zakresie 3–7% wagowych (Menzies i in. 2005). Stwierdzono występowanie róż-

nic rzędu 2,5% wagowych w zawartości troilitu uzyskanych dla tych samych meteoratów stosując obie techniki: mössbauerowską i XRD.

Także różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC) umożliwiła precyzyjne określenie zawartości troilitu w meteoratach. Do tego celu wykorzystuje się przejście fazowe α/β w troilicie: temperaturę tego przejścia oraz ciepło przemiany fazowej α/β (Szurgot i in. 2012, Łuszczek i Wach 2014, Bartoschewitz i in. 2017).

Wnioski

Niniejsza praca prezentuje wyniki badań średniego ciężaru atomowego A_{mean} , średniej liczby porządkowej Z_{mean} , stosunku A_{mean}/Z_{mean} oraz gęstości ziaren meteorytu Vicência sklasyfikowanego w oparciu o dane petrologiczno-mineralogiczne jako chondryt zwyczajny LL3.2.

1. W oparciu o dane literaturowe o składzie chemicznym meteorytu i związki wyprowadzone przez autora otrzymano dla chondrytu Vicência następujące wartości A_{mean} , Z_{mean} oraz A_{mean}/Z_{mean} :

$$A_{mean} = 22,91, Z_{mean} = 11,37, A_{mean}/Z_{mean} = 2,015.$$

2. Średni ciężar atomowy Vicência: 22,91 (dla składu bez wody) jest bliski średniej wartości A_{mean} dla chondrytów grupy LL: 23,36, bliski dla spadków chondrytów grupy LL3: 23,48 (Szurgot 2016b), oraz bliski dla wielu indywidualnych chondrytów: Semarkona LL3.0: 23,2 (Szurgot 2017b), Olivenza LL5: 23,29 (Szurgot 2018), Hautes Fagnes LL5: 23,11-23,35 (Szurgot 2016d), oraz NWA 7915 LL5: 22,80 (Szurgot 2016d).
3. Na podstawie obliczonych wartości A_{mean} chondryt Vicência należy do grupy LL, zgodnie z jego klasyfikacją petrologiczno-mineralogiczną (Keil i in. 2015).
4. Potwierdzono, że trzy wcześniej odkryte przez autora zależności: $A_{mean}(Fe/Si)$, $A_{mean}(dgrain)$ oraz $A_{mean}(\log\chi)$ są użyteczne do przewidywania i weryfikacji wartości A_{mean} i mogą być wykorzystywane do klasyfikacji chondrytów zwyczajnych, a także do jej weryfikacji.
5. Nowe zależności wprowadzone dla przewidywania wartości A_{mean} (równanie (5) ($A_{mean}(Fe/Si)$) oraz (12) ($A(dgr, \chi, Fe/Si)$)) potwierdzają ich użyteczność. Zbliżoną wartość A_{mean} do tej wskazanej przez skład chemiczny uzyskuje się z równania (12): $A(dgr, \chi, Fe/Si) = 22,72 \pm 0,73$, prawie identyczną z przewidywaną przez równanie (11): $A(dgr, \chi, Fe/Si) = 22,65 \pm 0,66$. Równanie (5) przewiduje $A_{mean}(Fe/Si) = 23,26$, a wcześniej odkryte przez autora równanie (4) $A_{mean}(Fe/Si) = 23,06$. Oznacza to, że dla meteorytu Vicência nowsza wersja zależności $A_{mean}(Fe/Si)$ (równ. (5)) jest wartościowa i prowadzi do porównywalnego wyniku ale, w przeciwieństwie do meteoratów hiszpańskich, nie poprawia przewidywania wartości A_{mean} .
6. Ustalono, że stosunek atomowy Fe/Si dla chondrytu Vicência wynosi 0,492. Wartość stosunku Fe/Si dla meteorytu Vicência jest bliska średniej dla chon-

- drytów grupy LL, wynoszącej 0,520. Jest to kolejny dowód na przynależność meteorytu Vicência do chondrytów LL.
7. Stwierdzono, że eksperymentalnie określona gęstość ziaren daje wartość zaniżoną średniego ciężaru atomowego Vicência określonego z zależności $A(dgrain)$: 21,89. Dobrą, zbliżoną do wartości $A_{mean}(skład\ chemiczny)$ przewiduje podatność magnetyczną ($A(log\chi) = 23,01$) oraz stosunek atomowy Fe/Si : $A(Fe/Si) = 23,06$ (równ. (4)), 23,28 (równ. (5)).
 8. Wyprowadzono nowe zależności dla przewidywania wartości gęstości ziaren oparte o związek $dgr(Fe/Si)$ (równania (17) i (19)). Równanie (17) prowadzi do wartości $dgr(Fe/Si) = 3,47\text{ g/cm}^3$ dla meteorytu Vicência, oraz $dgr(Fe/Si) = 3,35\text{ g/cm}^3$ dla krzemianów, a równanie (19) prowadzi do wartości $dgr(Fe/Si) = 3,49\text{ g/cm}^3$ dla meteorytu Vicência, oraz $dgr(Fe/Si) = 3,32\text{ g/cm}^3$ dla krzemianów. Oznacza to, że eksperymentalna wartość gęstości ziaren dotychczas zmierzona dla meteorytu Vicência ($dgr = 3,28\text{ g/cm}^3$, Keil i in. 2015) może być zaniżona i powinna być ponownie zweryfikowana.
 9. Określono gęstość ziaren meteorytu Vicência, jego krzemianów oraz metalu (Fe, Ni, Co) wykorzystując zależność $dgr(A_{mean})$ (równ. (7)). Otrzymano wartości: $3,42\text{ g/cm}^3$ dla meteorytu Vicência, $3,25\text{ g/cm}^3$ dla jego krzemianów, oraz $7,90\text{ g/cm}^3$ dla części metalicznej meteorytu Vicência.
 10. Stwierdzono, że dla chondrytów zwyczajnych wartość stosunku A_{mean}/Z_{mean} mieści się w stosunkowo wąskim, ale nieco poszerzonym w stosunku do ostatniego ustalenia (Szurgot 2017d) zakresie: 2,015–2,030.
 11. Wykorzystując literaturowe dane mössbauerowskie Keila i współpracowników (2015) określono zawartość troilitu w meteorycie Vicência: $FeS = 5,24 \pm 0,60\%$ wagowych.

Podziękowania

Autor serdecznie dziękuje żonie mgr farm. Jadwidze Szurgot za jej wsparcie, okazaną pomoc i konsultacje podczas badań. Profesorowi Tadeuszowi Przylibskiemu autor wyraża wdzięczność za zainteresowanie przebiegiem badań oraz zachętę do ich kontynuowania. Doktorowi Radosławowi Wachowi autor wyraża wdzięczność za wnikliwą analizę wyników oraz cenne sugestie dotyczące prezentacji rezultatów badań.

Literatura

- Anderson D.L., 1989, *Theory of the Earth*, Blackwell, London.
- Anderson D.L., Kovach R. L., 1967, *The composition of the terrestrial planets*, Earth Planet. Sci. Lett., 3, s. 19–24.
- Anderson D.L., Jordan T., 1970, *The composition of lower mantle*, Phys. Earth Planet. Interior, 3, s. 23–35.
- Bartoschewitz R., Appel P., Barrat J.-A., Bischoff A., Caffee M.W., Franchi, I.A. Gabelica Z., Greenwood R.C., Harir M., Harries D., Hochleitner R., Hopp J., Laubenstein M., Mader B., Marques R., Morlok A., Nolze G., Prudêncio M.I., Rochette P., Ruf A., Schmitt-Koppelin P., Seemann E., Szurgot M., Tagle R., Wach R.A., Welten K.C., Weyrauch M., Wimmer

- K. (The Braunschweig Meteorite Consortium), 2017, *The Braunschweig meteorite – a recent L6 chondrite fall in Germany*, *Chemie der Erde/Geochemistry*, 77, s. 207–224.
- Consolmagno G.J., Britt D.T., Macke R.J., 2008, *The significance of meteorite density and porosity*, *Chemie der Erde* 68, s. 1–29.
- Duda P., Rzepecka P., Jakubowska M., Woźniak M., Karwowski Ł., Gałązka-Friedman, 2017, *Badania mössbauerowskie siarczków żelaza w chondrytach zwyczajnych typu LL*, *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, 8, s. 30–39.
- Gałązka-Friedman J., Woźniak M., Duda P., Rzepecka P., Jakubowska M., Karwowski Ł., 2017, *Mössbauer spectroscopy – a useful method for classification of meteorites?* *Hyperfine Interact.*, 238, 67, DOI 10.1007/s10751-017-1439-1.
- Gałązka-Friedman J., Szlachta K., Karwowski Ł., Woźniak M., 2014, *Mössbauer studies of Soltmany and Shisr 176 meteorites – comparison with other ordinary chondrites*, *Hyperfine Interact.*, 226, s. 593–600.
- Gomes C.B., Keil K., 1980, *Brazilian Stone Meteorites*, Albuquerque.
- Hutchison R., 2004, *Meteorites – A petrologic, chemical and isotopic synthesis*, Cambridge.
- Jakubowska M., Rzepecka P., Duda P., Woźniak M., Gałązka-Friedman J., 2017, *Badania mössbauerowskie chondrytów zwyczajnych typu H potwierdzają stopień ich zwiętrzenia określony za pomocą skali W*, *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, 8, s. 63–72.
- Jarosewich E., 1990, *Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses*, *Meteoritics*, 35, s. 323–337.
- Keil K., Zucolotto M.E., Krot A.N., Doyle P.M., Telus M., Krot T.V., Greenwood R.C., Franchi I.A., Wasson J.T., Welten K.C., Caffè M.W., Sears D.W.G., Riebe M., Wieler R., dos Santos E., Scorzelli R.B., Gattacceca J., Lagroix F., Laubenstein M., Mendes J.C., Schmitt-Kopplin P., Harir M., Moutinho A.L.R., *The Vicência meteorite fall: A new unshocked (S1) weakly metamorphosed (3.2) LL chondrite*, *Meteoritics & Planetary Science*, 50, s. 1089–1111.
- Łuszczek K., Wach R.A., 2014, *NWA 6255 meteorite – thermophysical properties of interior and the crust*, *Meteorites*, 3, s. 33–44.
- Macke R. J., 2010, *Survey of meteorite physical properties: density, porosity and magnetic susceptibility*, Ph.D. Thesis, University of Central Florida, Orlando.
- Maj S., 1998, *Phonon thermal conductivity of geomaterials: Relationship to the density and mean atomic weight*, *Acta Geophys. Pol.*, 46, s. 415–425.
- Menzies O.N., Bland P.A., Berry F.J., Cressey G., 2005, *A Mössbauer spectroscopy and X-ray diffraction study of ordinary chondrites: Quantification of modal mineralogy and implications for redox conditions during metamorphism*, *Meteoritics & Planetary Science*, 40(7), s. 1023–1042.
- Meteoritical Bulletin Database, 2018, <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>.
- Przylibski T.A., 2016, *Chondryt Soltmany*, *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, 7, s. 93–122.
- Ringwood A.E., 1966, *Chemical evolution of the terrestrial planets*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 30, s. 41–104.
- Rochette P., Sagnotti L., Bourot-Denise M., Consolmagno G., Folco L., Gattacceca J., Osete L.M., Pesonen L., 2003, *Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites*, *Meteoritics & Planetary Science*, 38, s. 251–268.
- Rochette P., Gattacceca J., Bonal L., Bourot-Denise M., Chevrier V., Clerc J.P., Consolmagno G., Folco L., Gounelle M., Kohout T., Lauri Pesonen L., Eric Quirico E., Sagnotti L., Skripnik A., 2008, *Magnetic classification of stony meteorites: 2. Non-ordinary chondrites*, *Meteoritics & Planetary Science*, 43, s. 959–980.
- Rochette P., Gattacceca J., Lewandowski M., 2012, *Magnetic classification of meteorites and application to the Soltmany fall*, *Meteorites*, 2, s. 67–71.

- Stacey F.D., 2005, *High pressure equations of state and planetary interiors*, Rep. Prog. Phys., 68, s. 341–383.
- Szlachta K., Woźniak M., Gałązka-Friedman J., 2014, *Porównawcze badania mössbauerowskie meteorytów: Soltmany (L6), Chelyabinsk (LL5) i Grzempy (H5)*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 5, s. 115–120.
- Szurgot M., 2015a, *Mean atomic weight of Earth, Moon, Venus, Mercury and Mars. Effect of mass of cores and density of planets*, 46th Lunar Planet. Sci. Conf., #1536.pdf
- Szurgot M., 2015b, *Core mass fraction and mean atomic weight of terrestrial planets, moon, and protoplanet Vesta*, Comparative Tectonics and Geodynamics of Venus, Earth, and Rocky Exoplanets Workshop, #5001.pdf.
- Szurgot M., 2015c, *Średni ciężar atomowy chondrytu Soltmany, chondrytów L6 i minerałów poza-ziemskich*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 6, s. 107–128.
- Szurgot M., 2015d, *Mean atomic weight of Chelyabinsk and Olivenza LL5 chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 50(S1), #5008.pdf.
- Szurgot M., 2015e, *Mean atomic weight of Pultusk meteorite and H chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 50(S1), #5013.pdf.
- Szurgot M., 2016a, *Mean atomic weight of L/LL and H/L intermediate ordinary chondrites*, 47th Lunar Planet. Sci. Conf., Abstract #2180.
- Szurgot M., 2016b, *Mean atomic weight of ordinary chondrites. Effect of petrologic type*, Meteoritics & Planetary Science, 51(S1), #6021.pdf.
- Szurgot M., 2016c, *Mean atomic weight of Białystok eucrite, Łowicz mesosiderite, and Baszkówka chondrite*, Meteoritics & Planetary Science, 51(S1), #6005.pdf.
- Szurgot M., 2016d, *Średni ciężar atomowy chondrytów LL5: Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 7, s. 133–143.
- Szurgot M., 2017a, *Mean atomic weight of Earth and enstatite chondrites*, 48th Lunar Planet. Sci. Conf., Abstract #1130.
- Szurgot M., 2017b, *Mean atomic weight of chondrules and matrices in Semarkona, Allende and Sharps meteorites*, LPI Contrib. No. 1963, Workshop on Chondrules and Protoplanetary Disk, Abstract #2002.
- Szurgot M., 2017c, *Średni ciężar atomowy chondrytu Ensisheim (LL6)*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 8, s. 110–122.
- Szurgot M., 2017d, *Mean atomic weight of Stubenberg meteorite*, LPI Contrib. No. 2021, Workshop on Modern Analytical Methods Applied to Earth, Planetary, and Material Sciences II 2017, Abstract #6005.
- Szurgot M., 2017e, *Uncompressed density of the Moon, lunar mantle and core*, LPI Contrib. No. 2021, Workshop on Modern Analytical Methods Applied to Earth, Planetary, and Material Sciences II 2017, Abstract #6007.
- Szurgot M., 2017f, *Relationship between density of planetary materials and iron to silicon ratio. Grain density for ordinary chondrites, and uncompressed density for Moon, Earth, Venus, and Mars*, Meteoritics & Planetary Science, 52(S1), #6008.pdf.
- Szurgot M., Wach R.A., Przylibski T.A., 2012, *Thermophysical properties of the Soltmany meteorite*, Meteorites, 2, s. 53–65.
- Szurgot M., Wach R.A., Bartoschewitz R., 2017, *Mean atomic weight of Braunschweig meteorite*, Meteoritics & Planetary Science, 52(S1), #6002.pdf.
- Szurgot M., 2018, *Mean atomic weight of ordinary chondrites from Spanish falls*, LPI Contrib. No. 2083, 49th Lunar Planet. Sci. Conf., Abstract #1039.