

Marian SZURGOT¹

Średni ciężar atomowy chondrytów LL5: Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915

Mean atomic weight of LL5 chondrites: Siena, Hautes Fagnes
and NWA 7915

Abstract: Mean atomic weights A_{mean} of Siena (LL5, fall 1794), Hautes Fagnes (LL5, S1, W1, find 1965) and NWA 7915 (LL5, S2, W3, find 2010) ordinary chondrites have been determined using literature data on chemical composition of the meteorites and using relationship between mean atomic weight and Fe/Si atomic ratio (Szurgot 2015).

It was shown that NWA 7915 $A_{mean} = 22.80$ is close to mean atomic weight of LL chondrites ($A_{mean} = 23.00$), and is close to mean atomic weight of LL chondrite falls ($A_{mean} = 22.90$, Szurgot 2015). NWA 7915's Fe/Si atomic ratio (0.529) leads to $A_{mean} = 23.28$ which is close to the value determined by bulk composition. This means that NWA 7915 belongs to LL5 chondrites, as previously classified (Brawata et al. 2014).

Mean atomic weight A_{mean} of Hautes Fagnes determined by bulk composition is between 23.11 and 23.35. Lower A_{mean} value is close to A_{mean} of LL chondrites, but higher value is the same as A_{mean} of intermediate L/LL chondrites (23.34 for L/LL, Szurgot 2016). Hautes Fagnes Fe/Si atomic ratio and $A_{mean}(Fe/Si)$ are identical with those for NWA 7915 ($Fe/Si = 0.529$, $A_{mean} = 23.28$). A_{mean} data indicate that Hautes Fagnes can belong to LL5 chondrites, as previously classified (Vandeginste et al. 2012) or can be one of L/LL chondrites.

Mean atomic weight of Siena meteorite is much higher than expected for LL chondrite. Siena's bulk composition gives $A_{mean} = 24.47$, and $A_{mean}(Fe/Si)$ dependence gives $A_{mean} = 24.45$ ($Fe/Si = 0.7345$). Using dependence between mean atomic weight and grain density (Szurgot 2015) leads to $A_{mean} = 23.24$ ($d_{gr} = 3.46$ g/cm³, Macke 2010), and using dependence between A_{mean} and magnetic susceptibility (Szurgot 2016) gives $A_{mean} = 23.53 \pm 0.13$ ($\log \chi = 4.65 \pm 0.09$, Macke 2010). Bulk composition and Fe/Si ratio indicate that Siena has the same A_{mean} as intermediate H/L chondrites, for which $A_{mean} = 24.3$ (Szurgot 2016). Grain density indicates rather L/LL intermediate group for Siena, and magnetic susceptibility indicates intermediate L/LL or L chondrites (23.34 for L/LL, and 23.67 for L, Szurgot 2016).

Mean atomic number Z_{mean} , and A_{mean}/Z_{mean} ratio of the three meteorites have been also determined. Siena's $Z_{mean} = 12.104$, Hautes Fagnes $Z_{mean} = 11.445$ – 11.562 , and NWA 7915's $Z_{mean} = 11.293$. A_{mean}/Z_{mean} ratios are: 2.022 for Siena, 2.019–2.020 for Hautes Fagnes, and 2.019 for NWA 7915.

Keywords: chondrites, mean atomic weight, mean atomic number, elemental composition, grain density, Siena chondrite, Hautes Fagnes, NWA 7915 chondrite

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

Wstęp

Znajomość średniego ciężaru atomowego jest użyteczna do analizy budowy materii Ziemi i materii pozaziemskiej, minerałów i skał planet, planetoid i komet. Ciężar atomowy wpływa na szereg właściwości fizycznych materiałów i jest ważnym parametrem fizycznym przydatnym do analizy geochemicznej i geologicznej obiektów kosmicznych, przydatnym do analizy budowy wewnętrznej Księżyca, planet i planetoid (Birch 1961; Ringwood 1966; Anderson i Kovach 1967; Anderson i Jordan 1970; Anderson 1989; Maj 1998; Szurgot 2015a–g, 2016).

Celem prezentowanych badań było określenie i zanalizowanie średniego ciężaru atomowego A_{mean} i średniej liczby porządkowej Z_{mean} trzech meteorytów sklasyfikowanych jako chondryty zwyczajne LL5: Siena, Hautes Fagnes oraz NWA 7915.

Meteoryt Siena (LL5) należy do znanych, od dawna badanych skał pozaziemskich. Spadek tego chondrytu nastąpił w roku 1794 we Włoszech (Baldanza i in. 1969). Hautes Fagnes (LL5, S1, W1, Vandeginste i in. 2012) oraz NWA 7915 (LL5, S2, W3, Brawata i in. 2014) to niedawno opisane i sklasyfikowane chondryty. Hautes Fagnes został znaleziony w roku 1965 w Belgii, a NWA 7915 znaleziono w 2010 roku w Maroku. W tej samej grupie chondrytów LL5 znajdują się dwa ostatnio badane przez autora meteoryty: Chelyabinsk oraz Olivenza (Szurgot 2015f).

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–g, 2016).

Literaturowe dane eksperymentalne o średnim składzie pierwiastkowym meteorytów uzyskane za pomocą klasycznej analizy chemicznej oraz technik ICP-MS i XRF zostały wykorzystane przez autora do określenia średniego ciężaru atomowego chondrytów i średniej liczby porządkowej (Baldanza i in. 1969; Vandeginste i in. 2012; Brawata i in. 2014), natomiast dane zebrane przez Hutchisona i Jarosewicha (Jarosewich 1990; Hutchison 2004) o średniej zawartości pierwiastków i tlenków w chondrytach LL, L oraz H, L/LL i H/L posłużyły do określenia ciężaru atomowego poszczególnych grup chondrytów zwyczajnych.

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} oraz Z_{mean} wykorzystano następujące zależności opierając się na średnim składzie pierwiastkowym meteorytów:

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

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

gdzie wi (% wag.) to część wagi meteorytu pochodząca od i -go pierwiastka tworzącego chondryt, albo od i -go tlenku, Ai to ciężar atomowy/masa atomowa i -go pierwiastka, i /lub średni ciężar atomowy i -go tlenku, a Zi to liczba porządkowa i -go pierwiastka, i /lub średnia liczba porządkowa i -go tlenku. Średni ciężar atomowy pierwiastków Ai , tlenków oraz A_{mean} meteorytów jest wielkością bezwymiarową, podobnie jak względna masa atomowa pierwiastków. Bezwymiarowe są także liczby porządkowe Zi oraz Z_{mean} .

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

$$A_{mean} = (5,72 \pm 0,52) \cdot (Fe/Si)_{at} + (20,25 \pm 0,34), \quad (3)$$

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

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

$$A_{mean} = (7,51 \pm 0,13) \cdot d + (-2,74 \pm 0,55), \quad (4)$$

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 (4) pozwala określić A_{mean} znając gęstość ziaren d .

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

$$d = (0,133 \pm 0,002) \cdot A_{mean} + (0,37 \pm 0,07), \quad (5)$$

dla którego średni błąd kwadratowy wynosi $RMSE = 0,07$ (Szurgot 2015a, b, c). Stosując równanie (4) można określić gęstość ziaren d wykorzystując uprzednio określoną wartość A_{mean} .

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

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

dla którego współczynnik korelacji wynosi $R^2 = 0,95$, a średni błąd kwadratowy wynosi $RMSE = 0,24$.

Tabela 1. Zawartość pierwiastków w chondrytach Siena, Hautes Fagnes oraz NWA 7915 (% wagowe) oraz wartości A_{mean} i Z_{mean} chondrytów.

Meteoryt/pierwiastek <i>/A_{mean}/Z_{mean}</i>	<i>A_i</i>	<i>Z_i</i>	Siena	Hautes Fagnes		NWA 7915
			<i>w_i</i> (%wag.)	<i>w_i</i> (% wag.)		<i>w_i</i> (% wag.)
Si	28,086	14	17,33	18,41	18,41	18,59
Ti	47,867	22	0,08	0,07	0,07	0,07
Al	26,982	13	2,07	1,19	1,19	1,17
Cr	51,996	24	0,39	0,369	0,369	0,361
Fe	55,845	26	25,31	19,37	19,37	19,6
Mn	54,938	25	0,27	0,27	0,27	0,256
Mg	24,305	12	14,36	14,54	14,54	14,81
Ca	40,078	20	1,16	1,32	1,32	1,26
Na	22,99	11	0,67	0,69	0,69	0,68
K	39,098	19	0,13	0,093	0,093	0,1
P	30,974	15	0,19	0,11	0,11	0,087
Ni	58,693	28	1,39	1,13	1,13	0,74
Co	58,933	27	0,09	0,036	0,036	0,037
S	32,066	16	1,99	2,3*	2,2**	0,39
C	12,011	6	n.d	0,12*	0,09**	0,07
O	16	8	34,99	40*	37,7**	41,768#
H	1,00794	1	0,01	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	63,546	29	n.d.	n.d.	n.d.	0,0085
Zn	65,39	30	n.d.	n.d.	n.d.	0,0021
Σw_i			100,43	100,018	97,587	100
$\Sigma(w_i/A_i)$			4,103493	4,328608	4,179242	4,386903
$\Sigma(w_i/Z_i)$			8,297422	8,738958	8,440208	8,855418
<i>A_{mean}</i>			24,474	23,106	23,350	22,795
<i>Z_{mean}</i>			12,104	11,445	11,562	11,293
<i>A_{mean}/Z_{mean}</i>			2,022	2,019	2,020	2,019
<i>Fe/Si</i>			0,7345	0,5292	0,5292	0,5292
<i>A_{mean}(Fe/Si)</i>			24,451	23,277	23,277	23,277

Średnia zawartość pierwiastka: * dla grupy LL, ** dla grupy L (Hutchison 2004),

Określono przez uzupełnienie do 100%. Σ = suma.

Tabela 1 prezentuje skład pierwiastkowy, wartości w_i (% wag.), wartości A_{mean} oraz Z_{mean} obliczone z wykorzystaniem równań (1) oraz (2) i dane eksperymentalne o średnim składzie pierwiastkowym meteorytów: Siena (Baldanza i in. 1969), Hautes Fagnes (Vandeginste i in. 2012) oraz NWA 7915 (Brawata i in. 2014).

Tabela 2 zawiera dane określone przez autora (Szurgot 2016) 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 (Jarosewich 1990). Tabela 3 zawiera dane autora (Szurgot 2016) określone 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.

Tabela 2. Średnie wartości A_{mean} dla grup meteorytów zwyczajnych (Szurgot 2016).

Grupa	$A_{mean}(skład\ chem.)$	$A_{mean}(Fe/Si)$	$A_{mean}(d_{grain})$
	(równ. (1))	(równ. (3))	(równ. (4))
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 (Jarosewich 1990) [#] A_{mean} dla spadków LL, L, i H obliczone z zależności $A_{mean}(d_{grain})$ z wykorzystaniem danych d_{grain} określonych przez Mackego (Macke 2010).

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

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 (Jarosewich 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 meteorytów (Rochette i in. 2003).

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

$$A_{meanLL} < A_{meanL/LL} < A_{meanL} < A_{meanH/L} < A_{meanH}, \quad (7)$$

$$(Fe/Si)_{LL} < (Fe/Si)_{L/LL} < (Fe/Si)_L < (Fe/Si)_{H/L} < (Fe/Si)_H, \quad (8)$$

$$d_{grainLL} \approx d_{grainL/LL} < d_{grainL} < d_{grainH/L} < d_{grainH}, \quad (9)$$

$$\log\chi_{LL} < \log\chi_{L/LL} < \log\chi_L < \log\chi_{H/L} < \log\chi_H. \quad (10)$$

Tabele 2 i 3 i nierówności (7)–(10) pokazują, że średnie wartości A_{mean} , Fe/Si , d_{grain} i $\log\chi$ dla chondrytów grupy przejściowej L/LL są pomiędzy chondrytami L i LL, a dla grupy przejściowej chondrytów H/L są pomiędzy chondrytami H i L (Szurgot 2016). 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 2016).

W celu porównania wartości A_{mean} chondrytów: Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915 i średnich wartości A_{mean} dla różnych grup chondrytów zwyczajnych zestawiono dane A_{mean} w tabeli 4.

Tabela 4. Średni ciężar atomowy A_{mean} chondrytów Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915 oraz różnych grup chondrytów zwyczajnych.

Meteoryt/ A_{mean}	Siena	Hautes Fagnes	NWA 7915	LL	L/LL	L	H/L	H
A_{mean} (skład chemiczny)	24,47	23,11–23,35	22,80	22,90	23,34	23,67	24,32	24,63
A_{mean} (Fe/Si)	24,45 (0,734)	23,28 (0,529)	23,28 (0,529)	23,22	23,33	23,65	24,40	24,87
A_{mean} (d_{grain})	23,25 (3,46)	24,00 (3,56)	–	23,70	23,62	24,15	24,60	25,12
A_{mean} ($\log\chi$)	23,53 (4,65)	22,31 (3,83)	–	22,72	23,54	23,86	24,06	24,53

Dane z tabeli 1 i 4 pokazują, że średni ciężar atomowy meteorytu Siena jest dużo wyższy niż oczekiwany dla chondrytów LL. Średni skład pierwiastkowy meteorytu prowadzi do wartości $A_{mean} = 24,47$, a zależność $A_{mean}(Fe/Si)$ (równ. (3)) daje wartość $A_{mean} = 24,45$ ($Fe/Si = 0,7345$). Wykorzystując zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym i gęstością ziaren (równ. (4)) (Szurgot 2015a, b, c) prowadzi do $A_{mean} = 23,25$ ($d_{gr} = 3,46 \text{ g/cm}^3$, Macke 2010), a wykorzystanie zależności pomiędzy A_{mean} i podatnością magnetyczną (równ. (6)) (Szurgot 2016) wartość $A_{mean} = 23,53 \pm 0,13$ ($\log\chi = 4,65 \pm 0,09$, Macke 2010). Skład pierwiastkowy i stosunek atomowy Fe/Si wskazują, że Siena ma ten sam ciężar atomowy A_{mean} jak chondryty przejściowe H/L, dla których $A_{mean} = 24,3$ (Szurgot 2016). Gęstość ziaren wskazuje raczej grupę L/LL dla Sieny, a podatność magnetyczna wskazuje grupę L/LL lub grupę L ($A_{mean} = 23,34$ dla L/LL, a $A_{mean} = 23,67$ dla chondrytów L (Szurgot 2016)).

Średni skład pierwiastkowy chondrytu NWA 7915 prowadzi do wartości $A_{mean} = 22,80$, która jest bliska średniemu ciężarowi atomowemu chondrytów grupy LL ($A_{mean} = 23,00$) i jest bliska średniemu ciężarowi atomowemu spadków chondrytów LL ($A_{mean} = 22,90$, Szurgot 2015d). Stosunek atomowy Fe/Si dla chondrytu NWA 7915 wynosi 0,529 co daje $A_{mean} = 23,28$, bliskie wartości

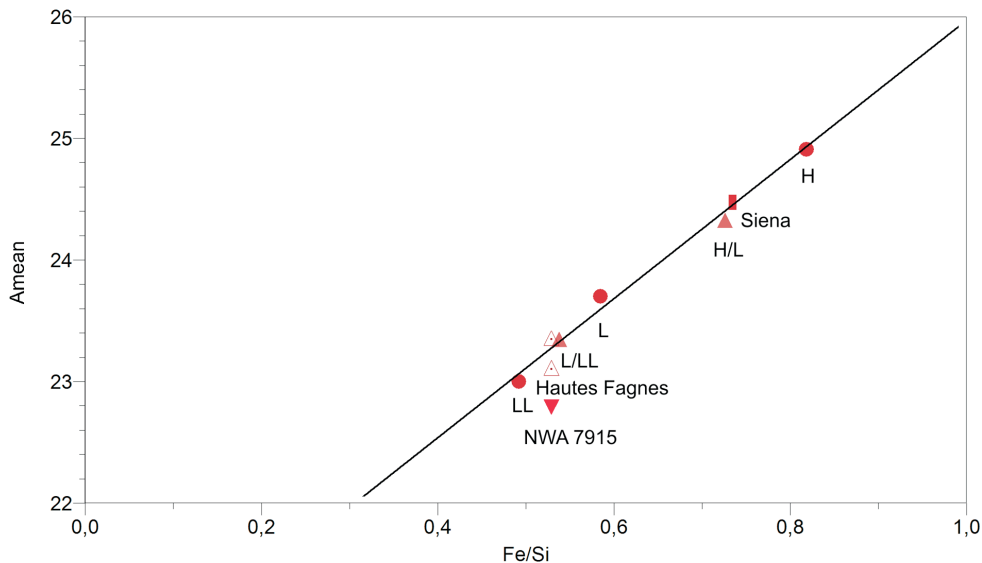
Amean wynikającej ze średniego składu pierwiastkowego meteorytu NWA 7915 (tab. 1 i 4). Dane te wskazują, że meteoryt NWA 7915 należy do grupy LL5 chondrytów zwyczajnych, zgodnie z oficjalną klasyfikacją (Brawata et al. 2014).

Brak danych eksperymentalnych d_{grain} oraz $\log\chi$ nie pozwala na przewidywanie wartości *Amean* tego meteorytu korzystając z zależności *Amean*(d_{grain}) oraz zależności *Amean*($\log\chi$). Równanie (5) przewiduje $d_{grain} = 3,40 \pm 0,07$ g/cm³, a równanie (7) przewiduje $\log\chi = 4,21 \pm 0,16$ dla chondrytu NWA 7915.

Średni skład pierwiastkowy chondrytu Hautes Fagnes prowadzi do zakresu wartości *Amean* pomiędzy 23,11 i 23,35. Wartość niższa *Amean* prowadzi do przyporządkowania Hautes Fagnes do chondrytów LL, a wartość wyższa jest taka sama jak *Amean* chondrytów grupy przejściowej L/LL (23,34 dla L/LL, Szurgot 2016). Stosunek atomowy *Fe/Si* meteorytu Hautes Fagnes i wynikający z niego średni ciężar atomowy określony z zależności *Amean*(*Fe/Si*) są identyczne z tymi dla chondrytu NWA 7915 (*Fe/Si* = 0,529, *Amean* = 23,28). Dane *Amean* wskazują, że Hautes Fagnes może należeć do chondrytów LL5, jak został sklasyfikowany (Vandeginste i in. 2012) lub może być jednym z chondrytów grupy przejściowej L/LL, co wydaje się bardziej prawdopodobne. Dwie wartości *Amean* określone w oparciu o skład objętościowy meteorytu Hautes Fagnes wynikają z braku w oryginalnej pracy Vandeginste i współpracowników danych eksperymentalnych dotyczących zawartości trzech pierwiastków: tlenu, siarki i węgla w tym meteorycie. Dlatego do obliczeń *Amean* i *Zmean* wykorzystano średnią zawartość tych pierwiastków w grupie LL, oraz w grupie L chondrytów (tab. 1), zgodnie z danymi Hutchisona (Hutchison 2004).

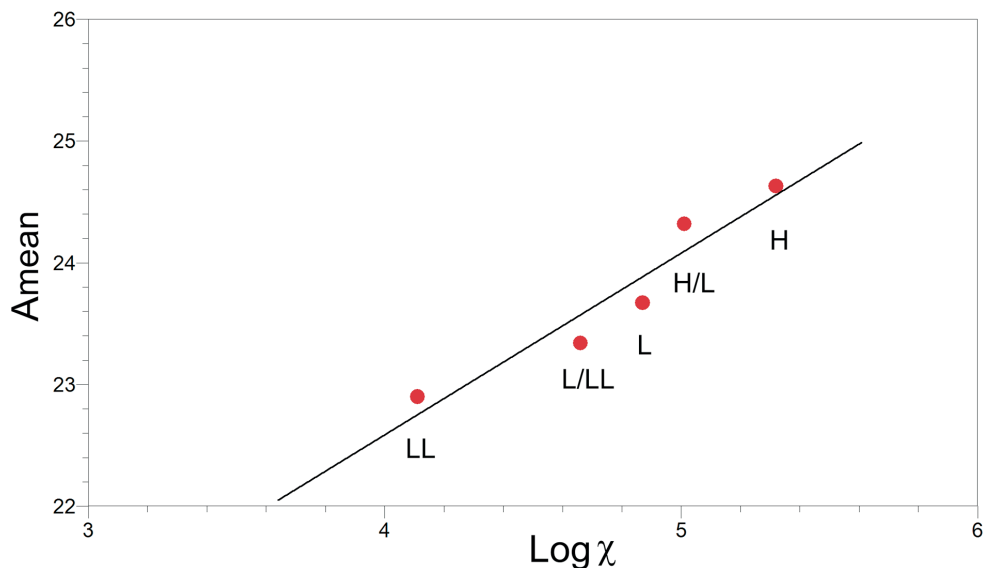
Średnia liczba porządkowa *Zmean*, oraz stosunek *Amean/Zmean* dla trzech badanych chondrytów zostały również określone (tab. 1). Otrzymano następujące wartości: *Zmean* = 12,104 dla Sieny, *Zmean* = 11,445–11,562 dla Hautes Fagnes oraz *Zmean* = 11,293 dla NWA 7915. Stosunek *Amean/Zmean*: 2,022 dla Sieny, 2,019–2,020 dla Hautes Fagnes oraz 2,019 dla NWA 7915.

Rysunek 1 prezentuje zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym *Amean* oraz stosunkiem atomowym *Fe/Si* dla grup chondrytów zwyczajnych: LL, L/LL, H/L, H oraz chondrytów: Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915. Wartości *Amean* i *Fe/Si* dla chondrytów LL, L oraz H pochodzą z wcześniejszej pracy autora (Szurgot 2015c), a wartości *Amean* i *Fe/Si* z najnowszej pracy autora (Szurgot 2016). Zależność *Amean*(*Fe/Si*) opisuje równanie (3). Wszystkie wartości *Amean* prezentowane tutaj wynikają ze średniego składu chemicznego chondrytów i zostały wyznaczone z równania (1). Prezentowane tutaj dane wskazują, że chondryt NWA 7915 należy do grupy LL, chondryt Hautes Fagnes należy raczej do grupy przejściowej L/LL, chociaż jego przynależność do grupy LL jest także możliwa, natomiast chondryt Siena to według danych *Amean* określonych z jego średniego składu chemicznego nie jest chondrytem grupy LL, a może być chondrytem grupy przejściowej H/L. Tak duży skok *Amean* jest wynikiem jego dużej zawartości żelaza, w stosunku do innych chondrytów LL, co wyraźnie widać z danych prezentowanych w tabeli 1.



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 chondrytów: Siena, Hautes Fagnes i NWA 7915.

Podatność magnetyczna jest obecnie dobrze zweryfikowaną wielkością fizyczną do klasyfikacji meteorytów, także chondrytów (Rochette i in. 2003; Rochette i in. 2008; Rochette i in 2012). Równanie (6) i rysunek 2 prezentują zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} i logarytmem podatności magnetycznej



Rys. 2. Zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} oraz logarytmem podatności magnetycznej chondrytów zwyczajnych LL, L/LL, L, H/L oraz H (Szurgot 2016).

meteorytu $\log\chi$ (Szurgot 2016). Współzależność pomiędzy A_{mean} i $\log\chi$ można wyrazić przez związek, wyrażony równaniem:

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

który umożliwia przewidywanie wartości $\log\chi$ w oparciu o znajomość A_{mean} . Średni błąd kwadratowy dla $\log\chi$ określonego z równania (7) wynosi $RMSE = 0,16$, a współczynnik korelacji wynosi $0,95$.

Wnioski

Niniejsza praca prezentuje wyniki badań średniego ciężaru atomowego A_{mean} , średniej liczby porządkowej Z_{mean} oraz stosunku A_{mean}/Z_{mean} trzech meteorytów: Siena, Hautes Fagnes oraz NWA 7915 sklasyfikowanych w oparciu o dane petrologiczno-mineralogiczne jako chondryty zwyczajne LL5. Do obliczeń wykorzystano dane składu chemicznego meteorytów zamieszczone w literaturze i związki wyprowadzone przez autora.

1. W oparciu o literaturowe dane o składzie chemicznym meteorytów i związki wyprowadzone przez autora otrzymano następujące wartości A_{mean} , Z_{mean} oraz A_{mean}/Z_{mean} :
Siena: $A_{mean} = 24,47$, $Z_{mean} = 12,10$, $A_{mean}/Z_{mean} = 2,022$,
Hautes Fagnes: $A_{mean} = 23,11$ – $23,35$, $Z_{mean} = 11,44$ – $11,56$, $A_{mean}/Z_{mean} = 2,019$ – $2,020$,
NWA 7915: $A_{mean} = 22,80$, $Z_{mean} = 11,29$, $A_{mean}/Z_{mean} = 2,019$.
2. Dane średniego ciężaru atomowego wskazują, że na podstawie obliczonych wartości A_{mean} :
chondryt Siena nie należy do grupy LL, ale raczej do chondrytów przejściowych H/L. Jest to wynikiem dużej zawartości żelaza, większej niż w innych chondrytach LL.
3. Meteoryt Hautes Fagnes według danych A_{mean} może być sklasyfikowany albo jako chondryt grupy LL, na którą wskazują jego właściwości petrologiczno-mineralogiczne lub może być przedstawicielem grupy przejściowej L/LL. Ostateczne rozstrzygnięcie wymaga dokładnej zawartości tlenu, siarki i węgla w tym meteorycie.
4. Meteoryt NWA 7915 według danych A_{mean} należy do grupy LL chondrytów zwyczajnych, zgodnie z jego klasyfikacją (Brawata i in. 2014).
5. Dotychczasowe dane A_{mean} autora dotyczące chondrytów LL nie pozwalają na weryfikację typu petrologicznego. Dlatego typ petrologiczny chondrytów Siena, Hautes Fagnes oraz NWA 7915 należy przyjąć jako 5, jak poprzednio ustalono (Baldanza i in. 1969; Vandeginste i in. 2012; Brawata i in. 2014).
6. Potwierdzono, że trzy odkryte przez autora zależności: $A_{mean}(Fe/Si)$, $A_{mean}(d_{grain})$ oraz $A_{mean}(\log\chi)$ są użyteczne do przewidywania i weryfikacji wartości A_{mean} i mogą być wykorzystywane do przewidywania lub weryfikacji klasyfikacji chondrytów zwyczajnych.

7. Ustalono, że stosunek atomowy Fe/Si dla chondrytu Siena wynosi 0,734, dla chondrytów Hautes Fagnes oraz NWA 7915 jest jednakowy i wynosi 0,529. Wartość stosunku Fe/Si dla meteorytu NWA 7915 jest zgodna z danymi Brawaty i współautorów.
8. Wykorzystując odkryte przez autora zależności: $d_{grain}(A_{mean})$ oraz $\log\chi(A_{mean})$ zostały przewidziane dla meteorytu NWA 7915 następujące wielkości fizyczne: gęstość ziaren $d_{grain} = 3,40 \pm 0,07$ g/cm³ oraz logarytm podatności magnetycznej $\log\chi = 4,21 \pm 0,16$, które nie zostały dotychczas określone eksperymentalnie.
9. Wyniki prezentowane w tej pracy wykazują dużą użyteczność wykorzystywania średniego ciężaru atomowego w badaniach skał pozaziemskich.

PODZIĘKOWANIA: Autor serdecznie dziękuje żonie mgr farmacji Jadwidze Szurgot za okazaną pomoc i konsultacje podczas badań. Profesorowi Tadeuszowi Przylibskiemu autor wyraża wdzięczność za cenne uwagi i sugestie dotyczące prezentacji wyników 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.
- Baldanza B., Levi-Donati, G.R., Wiik H.B., 1969, *The Siena meteorite: Mineralogy and Chemistry*, Mineralogical Mag., 37, s. 34–44.
- Birch F., 1961, *Composition of the Earth's Mantle*, Geophys. J. Int., 4, s. 295–311.
- Brawata M., Kryza R., Jakubowski T., Przylibski T.A., Ćwiakalski J., Łuszczek K., 2014, *Northwest Africa 7915: A new approved LL5 chondrite from Morocco*, Meteorites, 3, s. 45–58.
- Consolmagno G.J., Britt D.T., Macke R.J., 2008, *The significance of meteorite density and porosity*, Chemie der Erde 68, s. 1–29.
- Hutchison R., 2004, *Meteorites-A petrologic, chemical and isotopic synthesis*, Cambridge.
- Jarosewich E., 1990, *Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses*, Meteoritics, 35, s. 323–337.
- 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.
- 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 & Planet. Sci., 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.,

- Skipnik A., 2008, *Magnetic classification of stony meteorites: 2. Non-ordinary chondrites*, Meteoritics & Planet. Sci., 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.
- Szurgot M., 2015a, *Mean atomic weight of Earth, Moon, Venus, Mercury and Mars. Effect of mass of cores and density of planets*, Lunar and Planetary Science Conference XXXXVI. #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 pozaziemskich*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 6, s. 107–128.
- Szurgot M., 2015d, *Mean atomic weight of Chelyabinsk and Olivenza LL5 chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 50 Suppl. S1. #5008.pdf
- Szurgot M., 2015e, *Mean atomic weight of Pultusk meteorite and H chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 50 Suppl. S1. #5013.pdf
- Szurgot M., 2015f, *Mean atomic number of Chelyabinsk, Soltmany and Pultusk meteorites*, 57 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, s. 172–173.
- Szurgot M., 2015g, *Średni ciężar atomowy minerałów pozaziemskich*, 57 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, s. 174–175.
- Szurgot M., 2016, *Mean atomic weight of L/LL and H/L intermediate ordinary chondrites*, Lunar Planet. Sci. Conf., 47th: Abstract #2180.
- Vandeginste V., Goethals H., De Vos W., Hertogen J., Lagrou D., 2012, *The Hautes Fagnes meteorite find: A new LL5 (S1) chondrite from Belgium*, Geologica Belgica, 15, s. 96–104.