

Marian SZURGOT<sup>1</sup>

# Średni ciężar atomowy chondrytu Ensisheim (LL6)

## Mean atomic weight of Ensisheim LL6 chondrite

**Abstract:** Mean atomic weight  $A_{mean}$  of Ensisheim (LL6, fall 1492) ordinary chondrite has been determined using literature data 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 (Szurgot 2015a–f, 2016a, b, d, e).

It was shown that Ensisheim's  $A_{mean} = 23.32$ , and  $23.06$  for composition without water, and with  $H_2O$ , respectively. These values are close to the mean atomic weight of LL chondrite falls ( $A_{mean} = 23.36$ , and  $23.03$ ), and are close to  $A_{mean}$  values of LL6 chondrite falls ( $A_{mean} = 23.30$ , and  $23.06$ , Szurgot 2016b). Ensisheim's  $Fe/Si$  atomic ratio (0.509) leads to  $A_{mean} = 23.16 \pm 0.12$  which is close to the values determined by bulk composition. This means that Ensisheim belongs to LL6 chondrites, as previously classified (Jarosewich i Dodd 1985).

Using dependence between mean atomic weight and grain density (Szurgot 2015a–c, 2016d) leads to  $A_{mean} = 23.70 \pm 0.54$  ( $d_{gr} = 3.52 \pm 0.04$  g/cm<sup>3</sup>, Macke 2010), and using dependence between  $A_{mean}$  and magnetic susceptibility (Szurgot 2016a, d) gives  $A_{mean} = 22.78 \pm 0.24$  ( $\log \chi = 4.15 \pm 0.09$ , Macke 2010). Arithmetic mean  $A_{mean}(d_{gr})$  and  $A_{mean}(\log \chi)$  gives  $23.24 \pm 0.65$ , and arithmetic mean of  $A_{mean}(d_{gr})$ ,  $A_{mean}(\log \chi)$ , and  $A_{mean}(Fe/Si)$ , gives  $23.21 \pm 0.46$  values close each other, and close to  $A_{mean}(bulk\ composition)$  determined using compositional data.

Mean atomic number  $Z_{mean}$ , and  $A_{mean}/Z_{mean}$  ratio of the meteorite have been also determined. Ensisheim's  $Z_{mean} = 11.51$  for composition without  $H_2O$ , and  $11.40$  for composition with  $H_2O$ .  $A_{mean}/Z_{mean}$  ratios are:  $2.026$  and  $2.023$ , for composition without water, and with  $H_2O$ , respectively.

Ensisheim's silicates shown values:  $A_{mean} = 22.19$ ,  $Z_{mean} = 10.97$ ,  $A_{mean}/Z_{mean} = 2.022$ ,  $Fe/Si = 0.355$ ,  $A_{mean}(Fe/Si) = 22.28$ , and Fe, Ni metal values:  $A_{mean} = 57.26$ ,  $Z_{mean} = 26.96$ , and  $A_{mean}/Z_{mean} = 2.124$ .

**Keywords:** Ensisheim chondrite, ordinary chondrite, LL6 chondrite, mean atomic weight, mean atomic number, grain density, iron to silicon ratio

## Wstęp

Ciężar atomowy określa szereg właściwości fizycznych materiałów i jest ważnym parametrem fizycznym przydatnym do analizy geochemicznej i geologicznej obiektów

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

tów 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–g, 2016a–e, 2017a, b). Zainteresowanie autora i innych badaczy tą ważną wielkością fizyczną wynika z potrzeby znajomości ciężaru atomowego, aby zanalizować materię ziemską i pozaziemską, minerały i skały planet, planetoid i komet, określić wpływ ciężaru atomowego na inne właściwości fizyczne i ujawnić współzależności między nimi.

Celem prezentowanych badań było określenie i zanalizowanie średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}$  i średniej liczby porządkowej  $Z_{mean}$  meteorytu Ensisheim sklasyfikowanego jako chondryt zwyczajny LL6 (Jarosewich i Dodd 1985, McSween i Bennett III 1991), ze stopniem zszokowania S2 (Macke 2010).

Meteoryt Ensisheim należy do znanych, od dawna badanych skał pozaziemskich. Meteoryt ten odegrał ważną rolę w historii meteorytyki i Europy. Spadek chondrytu Ensisheim nastąpił w średniowieczu, w roku 1492 w Alzacji, we Francji (Rowland 1990, Marvin 1992). Do tej samej grupy chondrytów LL należą ostatnio badane przez autora meteoryty Chelyabinsk i Olivenza (Szurgot 2015f), a także chondryty Siena, Hautes Fagnes oraz NWA 7915, charakteryzujące się niższym typem petrograficznym 5 (Szurgot 2016d).

## 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, 2016a–e, 2017a, b).

Literaturowe dane eksperymentalne o średnim składzie pierwiastkowym i tlenkowym chondrytu Ensisheim uzyskane za pomocą klasycznej analizy chemicznej, z wykorzystaniem specjalnych procedur wypracowanych dla meteorytów, zostały wykorzystane przez autora do określenia średniego ciężaru atomowego i średniej liczby porządkowej tego chondrytu (Jarosewich i Dodd 1985, Jarosewich 1990). Dane zebrane przez Hutchisona (2004) i Jarosewicha (1990) 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  $A_{mean}$ ,  $Z_{mean}$  i  $A_{mean}/Z_{mean}$  wykorzystano następujące zależności opierając się na średnim składzie pierwiastkowym i tlenkowym meteorytów:

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

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

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

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 ( $A_{mean}$ ,  $A$ ) 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  $RSME = 0,12$ .

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

$$A_{mean} = (7,51 \pm 0,13) \cdot d + (-2,74 \pm 0,55), \quad (5)$$

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

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

$$d = (0,133 \pm 0,002) \cdot A_{mean} + (0,37 \pm 0,07), \quad (6)$$

dla którego średni błąd kwadratowy wynosi  $RMSE = 0,07$  (Szurgot 2015a, b, c). Stosując równanie (6) 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:

$$A_{mean} = 1,49 \cdot \log\chi + 16,6, \quad (7)$$

dla którego współczynnik korelacji wynosi  $R^2 = 0,95$ , a średni błąd kwadratowy wynosi  $RMSE = 0,24$ . Otrzymane z równania (7) wartości  $A_{mean}$  dotyczą składu meteorytów bez  $H_2O$ , ponieważ dla nich zależność  $A_{mean}(\log\chi)$  została wyznaczo-

na. 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). Współzależność pomiędzy  $A_{mean}$  i  $\log\chi$  można także wyrazić przez związek, wyrażony równaniem:

$$\log\chi = 0,61 \cdot A_{mean} - 9,7, \quad (8)$$

który umożliwia przewidywanie wartości  $\log\chi$  w oparciu o znajomość  $A_{mean}$  (Szurgot 2016a, d). Średni błąd kwadratowy dla  $\log\chi$  określonego z równania (8) 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 Ensisheim (Jarosewich i Dodd 1985, Jarosewich 1990). W tabeli 1 prezentowane są także dane eksperymentalne o gęstości ziaren  $d_{grain}$  (Macke 2010), logarytmie podatności magnetycznej  $\log\chi$  (Macke 2010) oraz obliczone przez autora wartości  $A_{mean}$  z równań (4), (5) i (7) oraz wartości stosunku atomowego  $Fe/Si$ . Oprócz zależności (1)–(8) wcześniej wyprowadzonych, zweryfikowanych i używanych przez autora, pewne nowe zależności (równania (10)–(13)) 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:

$$A_{mean}(\text{skład chemiczny}) \approx A_{mean}(Fe/Si) \approx A_{mean}(d_{grain}) \approx A_{mean}(\log\chi), \quad (9)$$

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

Z równań (4), (5) i (7) wynikają następujące zależności (równania (10)–(13)):

$$\begin{aligned} A_{mean}(d_{grain}, \chi, Fe/Si) &= (A_{mean}(d_{grain}) + A_{mean}(\log\chi) + A_{mean}(Fe/Si))/3 = \\ &= (7,51 \cdot d_{grain} + 1,49 \cdot \log\chi + 5,72 \cdot (Fe/Si))/3 + 11,37. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A_{mean}(d_{grain}, \chi) &= (A_{mean}(d_{grain}) + A_{mean}(\log\chi))/2 = \\ &= (7,51 \cdot d_{grain} + 1,49 \cdot \log\chi)/2 + 6,93. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A_{mean}(d_{grain}, Fe/Si) &= (A_{mean}(d_{grain}) + A_{mean}(Fe/Si))/2 = \\ &= (7,51 \cdot d_{grain} + 5,72 \cdot (Fe/Si))/2 + 8,76. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} A_{mean}(\chi, Fe/Si) &= (A_{mean}(\log\chi) + A_{mean}(Fe/Si))/2 = \\ &= (1,49 \cdot \log\chi + 5,72 \cdot (Fe/Si))/2 + 18,42. \end{aligned} \quad (13)$$

Tabela 1 pokazuje, że gęstość ziaren daje wartość zawyżoną  $A(d_{grain}) = 23,70 \pm 0,54$ , a podatność magnetyczna zaniżoną wartość ciężaru atomowego meteorytu Ensisheim  $A(\log\chi) = 22,78 \pm 0,24$ . Dobrą, zbliżoną do wartości  $A_{mean}(\text{skład chemiczny}) = 23,06$ – $23,32$  przewiduje stosunek atomowy  $Fe/Si$ :  $A(Fe/Si) =$

**Tabela 1.** Średnia zawartość tlenków i pierwiastków w chondrycie LL6 Ensisheim (Jarosewich i Dodd 1985, Jarosewich 1990), gęstość ziaren  $d_{grain}$  (Macke 2010), logarytm podatności magnetycznej  $log\chi$  (Macke 2010) oraz wartości  $A_{mean}$ ,  $Z_{mean}$ ,  $A_{mean}/Z_{mean}$  tego chondrytu.

Tlenek/pierwiastek	$A_i$	$Z_i$	Ensisheim		Krzemiany	Metal
			(z H <sub>2</sub> O)	(bez H <sub>2</sub> O)		
			$w_i$ (% wag.)	$w_i$ (% wag.)	$w_i$ (% wag.)	$w_i$ (% wag.)
SiO <sub>2</sub>	20,028	10	40,65	40,65	40,65	
TiO <sub>2</sub>	26,362	12,667	0,14	0,14	-	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,392	10	2,25	2,25	2,25	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,399	14,4	0,53	0,53	-	
FeO	35,922	17	17,26	17,26	17,26	
MnO	35,472	16,5	0,35	0,35	0,35	
MgO	20,152	10	25,54	25,54	25,54	
CaO	28,039	14	2,24	2,24	2,24	
Na <sub>2</sub> O	20,66	10	0,98	0,98	0,98	
K <sub>2</sub> O	31,397	15,833	0,05	0,05	0,05	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20,278	10	0,27	0,27	-	
Fe <sub>metal</sub>	55,845	26	2,40	2,40	-	2,40
Ni	58,693	28	1,05	1,05	-	1,05
Co	58,933	27	0,03	0,03	-	0,03
FeS	43,954	21	5,35	5,35	-	
C	12,011	6	0,09	0,09	-	
H <sub>2</sub> O	6,005	3,333	0,39	-	-	
$\Sigma w_i$			99,57	99,18	89,32	3,48
$Fe_{total}$			<b>19,24</b>	<b>19,24</b>	<b>13,42</b>	<b>2,40</b>
$\Sigma(w_i/A_i)$			4,31822459	4,25327871	4,02563359	0,06137484
$\Sigma(w_i/Z_i)$			8,73421451	8,61720280	8,14166420	0,13091880
$A_{mean}$ (skład chemiczny)			<b>23,06</b>	<b>23,32</b>	<b>22,19</b>	<b>56,70</b>
$Z_{mean}$			11,40	11,51	10,97	26,58
$A_{mean}/Z_{mean}$			<b>2,023</b>	<b>2,026</b>	<b>2,022</b>	<b>2,124</b>
$Fe/Si$			0,5093		0,3552	-
$A(Fe/Si)$			<b>23,16</b> ±0,12		<b>22,28</b>	-
$d_{grain}$			3,52±0,04			
$A(d_{grain})$			<b>23,70</b> ±0,54			-
$log\chi$			4,15±0,09		-	-
$A(log\chi)$			<b>22,78</b> ±0,24		-	-
$A(dgr, \chi)$			<b>23,24</b> ±0,65		-	-
$A(dgr, Fe/Si)$			<b>23,43</b> ±0,38		-	-
$A(\chi, Fe/Si)$			<b>22,97</b> ±0,27		-	-
$A(dgr, \chi, Fe/Si)$			<b>23,21</b> ±0,46		-	-

$\Sigma$  = suma.

23,16±0,12. Dane te pokazują, że błąd względny wynikający z zależności  $A(Fe/Si)$  wynosi 0,5% i jest najmniejszy, w porównaniu z błędem zależności  $A(dgrain)$  wynoszącym 2,3% i błędem zależności  $A(log\chi)$  wynoszącym 1,1%.

Przewidywane wartości  $A_{mean}$  meteorytu Ensisheim w oparciu o nowe zależności łączące dwie lub trzy właściwości meteorytu dają także całkiem dobre wartości, zbliżone do wartości  $A_{mean}(skład\ chemiczny)$ . Najbardziej zbliżone wartości  $A_{mean}$  do tych wskazywanych przez skład chemiczny uzyskano z równania (10):  $A(dgr, \chi, Fe/Si) = 23,21 \pm 0,46$ . Równanie (11) prowadzi do poprawnej wartości:  $A(dgr, \chi) = 23,24 \pm 0,65$ , wskutek kompensacji zawyżonej ( $A(dgrain)$ ) i zaniżonej ( $A(log\chi)$ ) wartości  $A_{mean}$ .

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

**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. (5))
LL	<b>22,90*</b>	23,22*	23,70 <sup>#</sup>
L/LL	<b>23,34±0,19</b>	23,33	23,62 <sup>#</sup>
L	<b>23,67*</b>	23,65*	24,15 <sup>#</sup>
H/L	<b>24,32±0,07</b>	24,40	24,60 <sup>#</sup>
H	<b>24,63*</b>	24,87*	25,12 <sup>#</sup>

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

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

$$A_{meanLL} < A_{meanL/LL} < A_{meanL} < A_{meanH/L} < A_{meanH}, \quad (14)$$

$$(Fe/Si)_{LL} < (Fe/Si)_{L/LL} < (Fe/Si)_L < (Fe/Si)_{H/L} < (Fe/Si)_H, \quad (15)$$

$$dgrain_{LL} \approx dgrain_{L/LL} < dgrain_L < dgrain_{H/L} < dgrain_H, \quad (16)$$

$$log\chi_{LL} < log\chi_{L/LL} < log\chi_L < log\chi_{H/L} < log\chi_H. \quad (17)$$

Tabele 2 i 3 oraz nierówności (14)–(17) pokazują, że średnie wartości  $A_{mean}$ ,  $Fe/Si$ ,  $dgrain$  i  $log\chi$  dla chondrytów grupy przejściowej L/LL są pomiędzy wartościami uzyskanymi dla chondrytów L i LL, a dla grupy przejściowej chondrytów

**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)

\* 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 meteorytów (Rochette i in. 2003).

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 Ensisheim 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 meteorytu Ensisheim jest oczekiwany dla chondrytu LL. Średni skład pierwiastkowy meteorytu prowadzi do zakresu wartości  $A_{mean} = 23,06–23,32$ , a zależność  $A_{mean}(Fe/Si)$  (równ. (4)) daje wartość  $A_{mean} = 23,16±0,12$  ( $Fe/Si = 0,509$ ). Wykorzystując zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym i gęstością ziaren (równ. (5)) (Szurgot 2015a, b, c) uzyskuje się wartość  $A_{mean} = 23,70±0,54$  ( $d_{gr} = 3,52±0,04$  g/cm<sup>3</sup>, Macke 2010), a wykorzystanie zależności pomiędzy  $A_{mean}$  i podatnością magnetyczną (równ. (7)) (Szurgot 2016a,d) daje wartość  $A_{mean} = 22,78±0,24$  ( $log\chi = 4,15±0,09$ , Macke 2010). Skład pierwiastkowy, stosunek atomowy  $Fe/Si$ , gęstość ziaren oraz podatność magnetyczna wskazują, że meteoryt Ensisheim jest chondrytem LL.

Ensisheim ma średni ciężar atomowy  $A_{mean}$  bliski chondrytom LL ( $A_{meanLL} = 22,90$ , Szurgot 2016a;  $A_{meanLL} = 23,03–23,36$ , Szurgot 2016b). Nie można jednak wykluczyć przynależności chondrytu Ensisheim do grupy przejściowej L/LL ponieważ  $A_{meanL/LL} = 23,34$  (Szurgot 2016a). Gęstość ziaren Ensisheim wskazuje na grupę LL ( $d_{grainLL} = 3,52$  g/cm<sup>3</sup>, Macke 2010), także podatność magnetyczna wskazuje grupę LL ( $log\chi_{LL} = 4,11±0,30$ , Macke 2010).

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 cieplnie chondryty zwy-

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

Meteoryt $A_{mean}$	Ensisheim (LL6)	LL	L/LL	L	H/L	H
$A_{mean}$ (skład chemiczny)	<b>23,06*</b> – <b>23,32**</b>	<b>22,90</b> <b>23,03<sup>#</sup></b> <b>23,36<sup>##</sup></b>	23,34	23,67	24,32	24,63
$A_{mean}(Fe/Si)$	<b>23,16</b> ±0,12	<b>23,22</b>	23,33	23,65	24,40	24,87
$A_{mean}(d_{grain})$	<b>23,70</b> ±0,54	<b>23,70</b>	23,62	24,15	24,60	25,12
$A_{mean}(log\chi)$	<b>22,78</b> ±0,16	<b>22,72</b>	23,54	23,86	24,06	24,53
$Fe/Si$	0,509	0,520	0,538	0,594	0,726	0,807
$d_{grain}$ (g/cm <sup>3</sup> )	3,52±0,04	3,52–3,54	3,51	3,56–3,58	3,64	3,71– 3,72
$log\chi$	4,15±0,09	4,11	4,66	4,87	5,01	5,32

\* Wartość dla składu chemicznego meteorytu Ensisheim zawierającego H<sub>2</sub>O. \*\* Wartość dla składu chemicznego Ensisheim bez H<sub>2</sub>O. <sup>###</sup> Wartość  $A_{mean}$  dla składu chemicznego chondrytów grupy LL: <sup>#</sup> z H<sub>2</sub>O, <sup>##</sup> bez H<sub>2</sub>O, według najnowszych danych autora (Szurgot 2016b).

czajne, 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. Tabela 5 prezentuje dane dla chondrytów LL należących do różnych typów petrograficznych od 3 do 6. Można zauważyć, że w grupie LL wartości  $A_{mean}$  dla składu meteorytu bez H<sub>2</sub>O w różnych typach petrologicznych są prawie jednakowe, ale po uwzględnieniu H<sub>2</sub>O typ 3 ma wyraźnie mniejszą wartość  $A_{mean}$  niż wartości  $A_{mean}$  w typach 4–6 meteorytów zmetamorfizowanych cieplnie.

Tabela 5 pokazuje, że dla chondrytów LL typu petrograficznego 6  $A_{meanLL6} = 23,30$  dla składu bez H<sub>2</sub>O, a  $A_{meanLL6} = 23,03$  dla składu chemicznego zawierającego H<sub>2</sub>O (Szurgot 2016b). Oznacza to, że chondryt Ensisheim, którego obie wartości  $A_{mean}$  (23,32 i 23,06 oraz ich średnia arytmetyczna 23,19±0,18) są prawie identyczne jak średnie wartości  $A_{mean}$  grupy LL6, jest chondrytem LL o typie petrograficznym 6, zgodnie z jego wcześniejszą klasyfikacją.

**Tabela 5.** Średni ciężar atomowy  $A_{mean}$  chondrytów zwyczajnych LL o różnym typie petrograficznym (Szurgot 2016b). Dane dotyczą spadków chondrytów.

Typ petrograficzny $A_{mean}$	3	4	5	6	$A_{mean}$ średnie*	$A_{mean}$ średnie**
$A_{mean}$ (skład chemiczny)	23,48 <sup>#</sup> (22,66)	23,39 <sup>#</sup> (23,25)	23,29 <sup>#</sup> (23,15)	23,30 <sup>#</sup> (23,06)	23,36 <sup>#</sup> (23,03)	22,90 <sup>#</sup>

\* Wartość średnia  $A_{mean}$  obejmująca wszystkie cztery typy petrograficzne 3–6. \*\* Wartość średnia  $A_{mean}$  grupy LL określona przez autora we wcześniejszej pracy (Szurgot 2016a). <sup>#</sup> Dla składu chemicznego meteorytu nie zawierającego H<sub>2</sub>O. W nawiasach podano wartości dla składu chemicznego meteorytu zawierającego H<sub>2</sub>O.

Średnia liczba porządkowa  $Z_{mean}$  oraz stosunek  $A_{mean}/Z_{mean}$  dla badanego chondrytu Ensisheim zostały również określone (tab. 1). Otrzymano następujące wartości:  $Z_{mean} = 11,40$ – $11,51$  oraz  $A_{mean}/Z_{mean} = 2,023$ – $2,026$ . Stosunek



$A_{mean}/Z_{mean}$  dla chondrytu LL6 Ensisheim jest zbliżony do wartości uzyskanych przez autora dla chondrytów LL5: 2,022 dla Sieny, 2,019–2,020 dla Hautes Fagnes oraz 2,019 dla NWA 7915 (Szurgot 2016d), 2,027 dla chondrytu Chelyabinsk (Szurgot 2015f) i jest zbliżony do wartości  $A_{mean}/Z_{mean}$  uzyskanych dla chondrytu L6 Sołtmany: 2,022 (Szurgot 2015f) oraz zbliżony do chondrytów grupy H4-5: 2,026 dla meteorytu Košice (Szurgot 2016e), 2,030 dla meteorytu Pułtusk (Szurgot 2015f, 2016e).

Powyższe dane wskazują, że wartość stosunku  $A_{mean}/Z_{mean}$  jest prawie jednokowa dla różnych grup chondrytów zwyczajnych. Dla czterech chondrytów grupy LL mieści się w zakresie 2,019–2,027, dla jednego przedstawiciela grupy L wynosi 2,022, dla dwóch 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 zmienia się w przedziale 2,019–2,030.

Średnia arytmetyczna dla ośmiu ww. chondrytów zwyczajnych wynosi:

$$A_{mean}/Z_{mean} = 2,024 \pm 0,004. \quad (18)$$

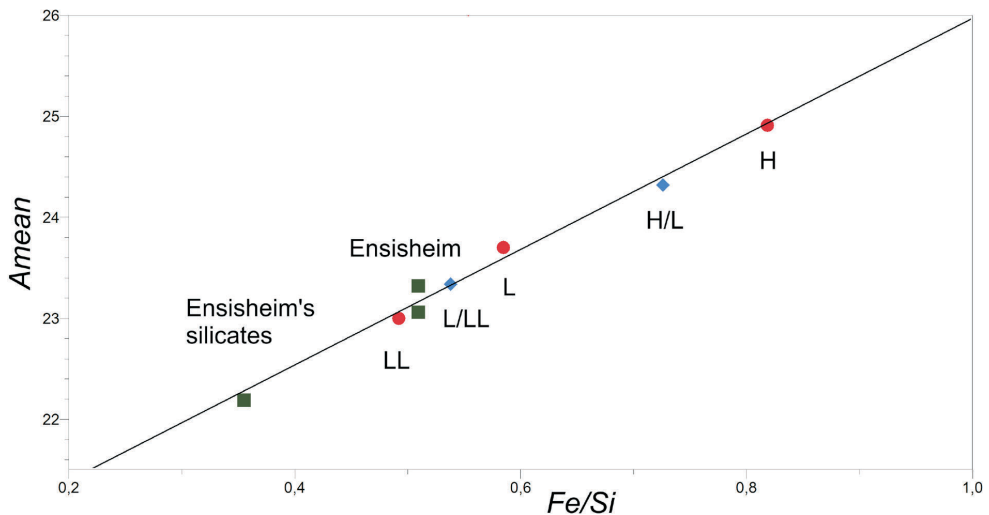
Prowadzi to do następujących zależności:

$$Z_{mean} = A_{mean}/2,024, \quad (19)$$

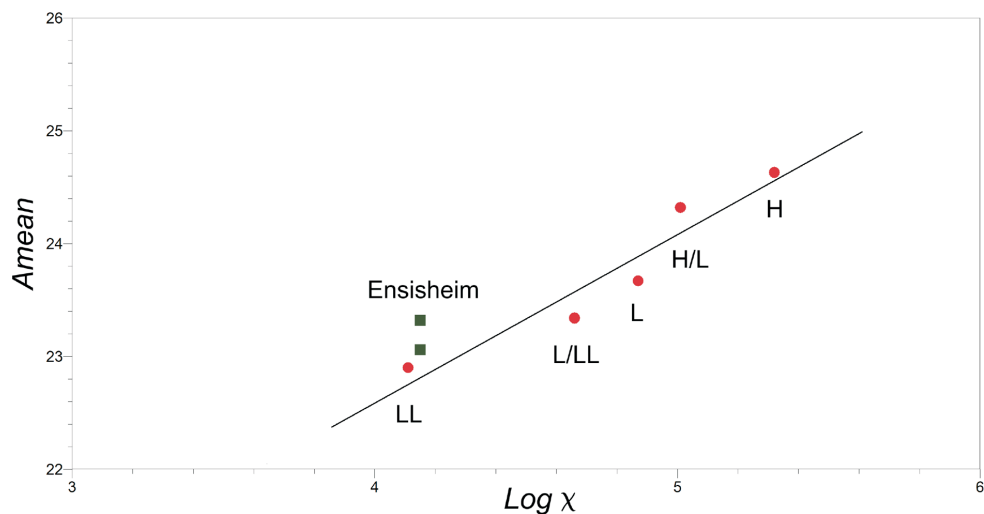
$$A_{mean} = 2,024 \cdot Z_{mean}. \quad (20)$$

Podstawienie równania (4) do równania (19) daje związek pomiędzy stosunkiem  $Fe/Si$  oraz  $Z_{mean}$ :

$$Z_{mean} = 2,83 \cdot (Fe/Si)_{at} + 10. \quad (21)$$



**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 Ensisheim. Wartość  $A_{mean}$  dla skały meteorytu Ensisheim wskazana przez górny punkt została obliczona dla składu bez  $H_2O$ , a niższa wartość  $A_{mean}$  wskazana przez dolny punkt została obliczona dla składu z  $H_2O$ . Krzemiany Ensisheim nie zawierają  $H_2O$ .



**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 Ensisheim. Wartości  $A_{mean}$  obliczono dla składu chemicznego meteorytów bez  $H_2O$ . Jedynie dolny punkt dla meteorytu Ensisheim został określony dla składu z  $H_2O$ .

Podstawienie wartości  $Fe/Si = 0,509$  do równania (21) daje wartość  $Z_{mean} = 11,44$  bliską wartości  $11,40$ – $11,51$  wyznaczonych z równania (2) i eksperymentalnych wartości średniego składu chemicznego chondrytu Ensisheim (tab. 1).

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 Ensisheim i krzemianów chondrytu Ensisheim. 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) nie tylko opisuje materię całej skały meteorytów, ale jak pokazuje rysunek 1 również ich krzemianów. Prezentowane dane wskazują, że chondryt Ensisheim należy do grupy LL.

Równanie (7) 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 (7) prowadzi do nieco zaniżonej wartości  $A_{mean}$  dla meteorytu Ensisheim. Widać, że meteoryt Ensisheim należy do grupy LL chondrytów zwyczajnych.

## Wnioski

Niniejsza praca prezentuje wyniki badań średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}$ , średniej liczby porządkowej  $Z_{mean}$  oraz stosunku  $A_{mean}/Z_{mean}$  meteorytu Ensis-

heim sklasyfikowanego w oparciu o dane petrologiczno-mineralogiczne jako chondryt zwyczajny LL6.

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

$$A_{mean} = 23,06 \text{ i } 23,32, \text{ wartość średnia: } 23,19 \pm 0,18,$$

$$Z_{mean} = 11,40 \text{ i } 11,51, \text{ wartość średnia: } 11,46 \pm 0,08,$$

$$A_{mean}/Z_{mean} = 2,023 \text{ i } 2,026, \text{ wartość średnia: } 2,024 \pm 0,002.$$

2. Dane odnoszące się do średniego ciężaru atomowego wskazują, że na podstawie obliczonych wartości  $A_{mean}$  chondryt Ensisheim należy do grupy LL, zgodnie z jego klasyfikacją petrologiczno-mineralogiczną (Jarosewich i Dodd 1985, Jarosewich i Bennett III 1991).
3. Wartości  $A_{mean}$  uzyskane przez autora dotyczące chondrytów LL o różnym stopniu metamorfizmu cieplnego pozwalają na weryfikację typu petrologicznego chondrytu Ensisheim. Ponieważ wartości  $A_{mean}$  chondrytu Ensisheim są prawie identyczne jak średnie wartości  $A_{mean}$  grupy LL6, można stwierdzić, że meteoryt Ensisheim jest chondrytem LL o typie petrograficznym 6, co jest zgodne z jego wcześniejszą klasyfikacją.
4. 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 klasyfikacji chondrytów zwyczajnych, a także do jej weryfikacji.
5. Ustalono, że stosunek atomowy  $Fe/Si$  dla chondrytu Ensisheim wynosi 0,509. Wartość stosunku  $Fe/Si$  dla meteorytu Ensisheim jest bliska średniej dla chondrytów grupy LL, wynoszącej 0,520. Jest to kolejny dowód na przynależność meteorytu Ensisheim do chondrytów LL.
6. Stwierdzono, że gęstość ziaren daje wartość zawyżoną ( $A(d_{grain}) = 23,70$ ), a podatność magnetyczna zaniżoną wartość ciężaru atomowego meteorytu Ensisheim ( $A(\log \chi) = 22,78$ ). Dobrą, zbliżoną do wartości  $A_{mean}$  (skład chemiczny) przewiduje stosunek atomowy  $Fe/Si$ :  $A(Fe/Si) = 23,16$ .
7. Wprowadzono nowe zależności dla przewidywania wartości  $A_{mean}$  (równania (10)–(13)). Stwierdzono, że najbardziej zbliżone wartości  $A_{mean}$  do tych wskazywanych przez skład chemiczny uzyskuje się z równania (10):  $A(d_{gr}, \chi, Fe/Si) = 23,21$  i z równania (11):  $A(d_{gr}, \chi) = 23,24$ .
8. Wyprowadzono nowe zależności dla przewidywania wartości  $Z_{mean}$  (równania (19) i (21)). Związek (21) prowadzi do wartości  $Z_{mean}(Fe/Si) = 11,44$  bliskiej wartościom 11,40 i 11,51 oraz ich średniej wartości 11,46 wyznaczonych z równania (2) i eksperymentalnych wartości średniego składu chemicznego meteorytu Ensisheim.
9. Stwierdzono, że dla chondrytów zwyczajnych wartość stosunku  $A_{mean}/Z_{mean}$  mieści się w zakresie 2,019–2,030, a wartość średnia wynosi 2,024 ± 0,004.

10. Prezentowane wyniki wskazują na dużą użyteczność zastosowanych zależności do przewidywania i weryfikacji średniego ciężaru atomowego, średniej liczby porządkowej oraz typu petrograficznego, w konsekwencji do klasyfikacji skał pozaziemskich.

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 cenne uwagi i wartościowe 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.
- Birch F., 1961, *Composition of the Earth's Mantle*, Geophys. J. Int., 4, s. 295–311.
- 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.
- Jarosewich E., Dodd, R.T., 1985, *Chemical variations among L-chondrites-IV. Analyses, with petrographic notes, of 13 L-group, and 3 LL-group chondrites*, Meteoritics, 20, s. 23–36.
- 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.
- Marvin U., 1992, *The meteorite of Ensisheim: 1492 to 1992*, Meteoritics, 27, s. 28–72.
- McSween, H.Y., Bennett III M.E., 1991, *The Mineralogy of Ordinary Chondrites and Implications for Asteroid Spectrophotometry*, Icarus, 90, s. 107–116.
- 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., Skripnik 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.
- Rowland I.D., 1990, *A Contemporary Account of the Ensisheim Meteorite, 1492*, Meteoritics, 25, s. 19–22.
- 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., 2016a, *Mean atomic weight of L/LL and H/L intermediate ordinary chondrites*. Lunar Planet. Sci. Conf., 47th: Abstract #2180.
- Szurgot M., 2016b, *Mean atomic weight of ordinary chondrites. Effect of petrologic type*, Meteoritics & Planetary Science, 51, Suppl. S1, #6021.pdf.
- Szurgot M., 2016c, *Mean atomic weight of Białystok eucrite, Łowicz mesosiderite, and Baszkówka chondrite*, Meteoritics & Planetary Science, 51, Suppl. 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., 2016e, *Mean atomic weight and mean atomic number of Košice and Pultusk H4-5 chondrites*, 58 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, s. 173–174.
- Szurgot M., 2017a, *Mean atomic weight of Earth and enstatite chondrites*. Lunar Planet. Sci. Conf., 48th: 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.