

Marian SZURGOT¹

Średni ciężar atomowy chondrytu Soltmany, chondrytów L6 i minerałów pozaziemskich

Mean atomic weight of Soltmany chondrite, L6 chondrites and extraterrestrial minerals

Abstract: Mean atomic weight A_{mean} of Soltmany (L6, S2, W0) ordinary chondrite, various L6 chondrites such as: Jesenice, Girgenti, Leedey, Bruderheim, Holbrook and Modoc, as well as LL, L and H chondrites has been determined using literature data on chemical composition of the meteorites. Relationship between mean atomic weight and Fe/Si atomic ratio for ordinary chondrites has been established. It was shown that Soltmany's $A_{mean} = 23.97$ is close to mean atomic weight of L chondrites $A_{mean} = 23.70$, and is close to mean atomic weight of L6 chondrites $A_{mean} = 24.06 \pm 0.16$. It has been established that Soltmany's Fe/Si atomic ratio ($Fe/Si = 0.588$) is close to Fe/Si ratio for L6 chondrites ($Fe/Si = 0.598$). This means that Soltmany belongs to L6 chondrites, as previously classified. Using discovered by the author (Szurgot, 2015) dependence between mean atomic weight and uncompressed density of planetary matter it was established that grain density of Soltmany meteorite should be equal to 3.56 ± 0.12 g/cm³, which is about 4% lower than previously estimated by porosity data. Mean atomic weight of extraterrestrial minerals present in ordinary chondrites and in Soltmany meteorite have been also determined.

Keywords: Chondrites, mean atomic weight, elemental composition, grain density, Soltmany chondrite, Jesenice chondrite, Girgenti chondrite, Leedey chondrite, Holbrook chondrite, Modoc chondrite.

Wstęp

Chondryty należą do grupy meteorytów, które zostały utworzone w początkach formowania Układu Słonecznego, a analiza ich składu pierwiastkowego i mineralnego dostarcza wiedzy o historii, ewolucji i przeobrażeniach materii naszego układu planetarnego.

Znajomość średniego ciężaru atomowego jest użyteczna do analizy materii Ziemi i materii pozaziemskiej, minerałów i skał planet, planetoid i komet. Ciężar atomowy wpływa na szereg właściwości fizycznych materiałów takich jak: gęstość, ciepło właściwe, przewodność cieplna, prędkość fal sejsmicznych oraz liniowy

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

i masowy współczynnik pochłaniania promieniowania rentgenowskiego i promieniowania gamma. Średni ciężar atomowy jest ważnym parametrem fizycznym przydatnym do analizy geochemicznej i geologicznej obiektów kosmicznych, przydatnym do analizy budowy wewnętrznej Księżyca, planet i planetoid (Szurgot 2015a, b).

Meteoryt Sołtmany należy do nowych, wciąż badanych skał pozaziemskich. Spadek tego chondrytu nastąpił 30 kwietnia 2011 roku w północnej Polsce. Od tego czasu meteoryt poddano wszechstronnym badaniom przez międzynarodowy zespół specjalistów z wykorzystaniem najnowszych technik eksperymentalnych. Wynikiem tych badań było uzyskanie szeregu wartościowych wyników naukowych o tym interesującym materiale pozaziemskim (Gałązka-Friedman i Szlachta 2012; Karwowski 2012; Laubenstein i in. 2012; Łuszczek i in. 2012; Przylibski i Łuszczek 2012; Rochette i in. 2012; Schmitt-Kopplin i in. 2012; Szurgot i in. 2012; Szlachta i in. 2014, Wach i in. 2013; Woźniak i Woźniak 2012). Meteoryt Sołtmany został sklasyfikowany jako chondryt zwyczajny L6 o średnim stopniu zszokowania S2 i najniższym stopniu zwietrzenia W0 (Karwowski i in. 2011, Karwowski 2012). Właściwości cieplne meteorytu: ciepło właściwe, dyfuzyjność cieplna, przewodność cieplna, także gęstość i porowatość oraz zawartość troilitu i przejścia fazowe w troilicie były przedmiotem dotychczasowych badań autora i współpracowników (Szurgot i in. 2012; Szurgot i in. 2013a, b; Szurgot i in. 2014; Wach i in. 2013). Właściwości termofizyczne to ważne źródło danych niezbędnych do modelowania ewolucji cieplnej planet i planetoid.

Celem prezentowanych badań było określenie i zanalizowanie średniego ciężaru atomowego chondrytu Sołtmany i jego minerałów wykorzystując literaturowe dane eksperymentalne o składzie pierwiastkowym meteorytu Sołtmany. Wyniki Przylibskiego i Łuszczek (Przylibski i Łuszczek 2012) dotyczące średniego składu pierwiastkowego meteorytu Sołtmany uzyskane za pomocą technik ICP-MS oraz XRF zostały wykorzystane przez autora do określenia średniego ciężaru atomowego tego chondrytu, natomiast dane zebrane przez Hutchisona (Hutchison 2004) o średniej zawartości pierwiastków i tlenków w chondrytach LL, L i H posłużyły do określenia ciężaru atomowego grupy chondrytów zwyczajnych. Wyniki wstępne składu pierwiastkowego chondrytu Sołtmany otrzymane przez nas w mikroobszarach za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej (Szurgot i Polański 2013a) zostały wykorzystane do uszeregowania zawartości pierwiastków tworzących meteoryt Sołtmany. Dane literaturowe o składzie minerałów (m.in. Yudin i Kolemenskij 1987) wykorzystano do obliczenia średniego ciężaru atomowego minerałów tworzących meteoryty, a dane o składzie minerałów chondrytu Sołtmany (Karwowski 2012) pozwoliły określić średni ciężar atomowy minerałów meteorytu Sołtmany. Średni ciężar atomowy wybranych chondrytów grupy L6 określono w oparciu o ich skład chemiczny korzystając z danych Masona (Mason 1979). W niniejszej pracy średni ciężar atomowy i średnia masa atomowa są traktowane jako synonimy i są wyrażane jako wielkość bezwymiarowa.

Metody badań

Praca ma charakter teoretyczny. Obliczeń średniego ciężaru atomowego dokonano wykorzystując zależności stosowane przez autora w badaniach planet ziemskich i Księżyca (Szurgot 2015a, b). Prowadzono także badania składu chemicznego meteorytu i jego mikrostruktury wykorzystując elektronowy mikroskop skaningowy VEGA 5135 Tescan wyposażony w mikroanalizator rentgenowski EDX. Obrazy BSE zawierają informacje o topografii powierzchni i o składzie pierwiastkowym meteorytu uwidocznionym w zróżnicowanym kontraście obrazu. W obrazach BSE obszary ciemne ujawniają minerały o małej uśrednionej masie atomowej i zbudowane z pierwiastków o małej liczbie porządkowej, a obszary jasne minerały o dużej masie atomowej i zbudowane z pierwiastków o dużej liczbie porządkowej. W mikroobszarach zidentyfikowano główne pierwiastki tworzące meteoryt Sołtmany.

Wyniki

Rysunek 1(a) prezentuje okaz skały, a rysunek 1(b) obraz BSE skały widzianej pod skaningowym mikroskopem elektronowym. Obrazy pokazują rozkład przestrzenny minerałów. Ujawniają dominację minerałów krzemianowych: oliwinów i piroksenów (szare na obrazie BSE, jasne na obrazie optycznym), obecność faz metalicznych: kamacytu i taenitu (FeNi, minerały jasne) i troilitu (FeS, minerały jasnoszare na obrazie BSE, złociste na obrazie optycznym), skalenia (jasne na obrazie optycznym, ciemnoszare na obrazie BSE) oraz chromitu (minerały czarne na obrazie optycznym, jasne na obrazie BSE).

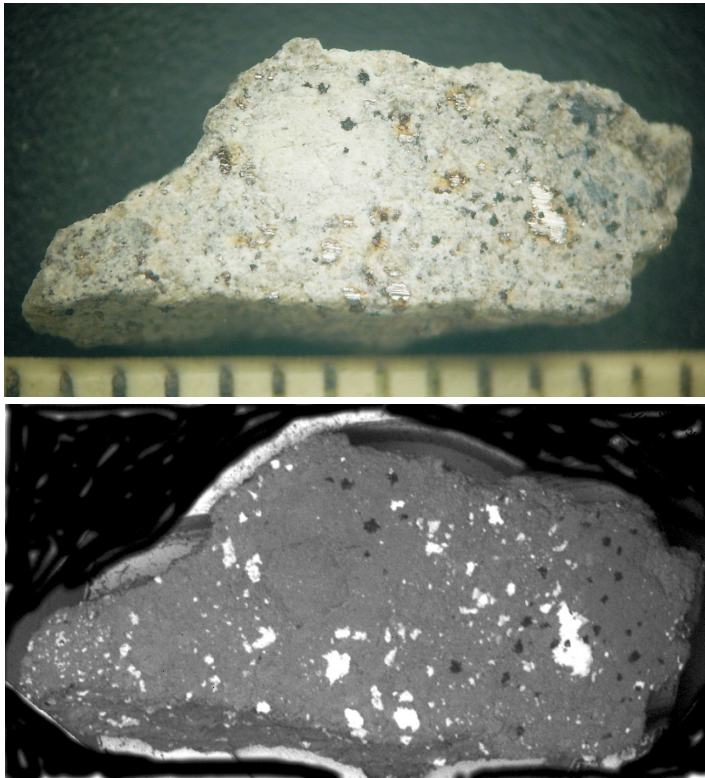
Przykładowe widmo EDS z mikroobszaru meteorytu Sołtmany o wymiarach 3×2 mm ujawniające średni skład pierwiastkowy meteorytu uwidoczniono na rysunku 2. Pokazuje ono, że głównymi pierwiastkami tworzącymi ten chondryt są: O, Si, Fe oraz Mg, które obejmują 92% całego składu mineralnego. Istotnymi składnikami meteorytu o wkładzie łącznym 8% są: Ca, Al, S, Na, Cr, Ni, K i C. Dowodzi ono, że oliwin, piroksen, skałen, kamacyt i taenit to główne minerały tego chondrytu. Widmo EDS ujawnia, że zawartość poszczególnych pierwiastków można wyrazić nierównościami:

$$\text{O} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Ca} \geq \text{S} > \text{Na} > \text{Ni} > \text{Cr} > > \text{K} > \text{C}. \quad (1)$$

Dane Przylibskiego i Łuszczek (Przylibski i Łuszczek 2012) otrzymane dokładniejszymi technikami (ICP-MS oraz XRF) na większej masie meteorytu (>10 g), tj. na bardziej reprezentatywnej próbce materii prowadzą do nierówności:

$$\text{O} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Mg} > > \text{S} > \text{Ni} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Na} > \text{Cr} > > \text{K} > > \text{C}. \quad (2)$$

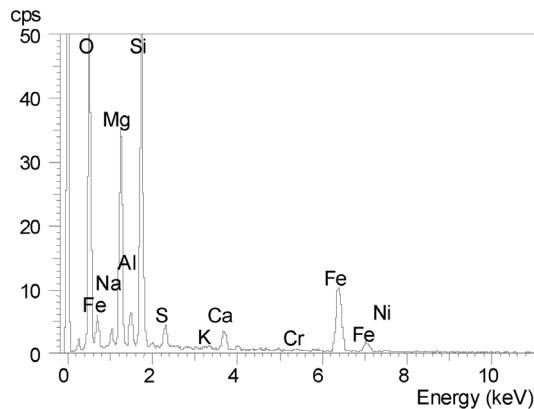
Pomimo zaistniałych różnic w uszeregowaniu zawartości pierwiastków wyniki Przylibskiego i Łuszczek prowadzą do tej samej sumarycznej zawartości czterech głównych pierwiastków O, Si, Fe i Mg wynoszącej 92% wagi i tej samej 8% wartości wkładu wagowego pozostałych wymienionych pierwiastków.



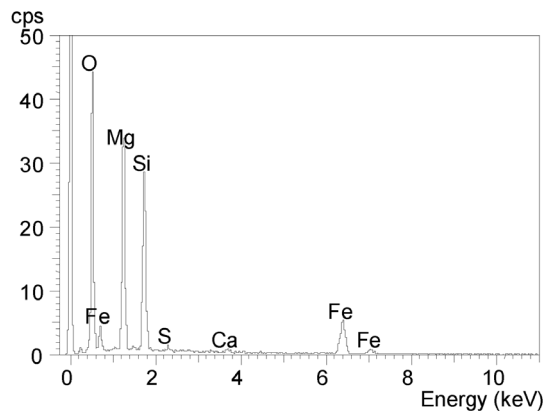
Rys. 1. (a) Obraz optyczny i (b) obraz BSE meteorytu Soltmany. Skala milimetrowa.

Widma EDS z różnych mikroobszarów chondrytu Soltmany wykazały obecność minerałów typowych dla chondrytów: oliwinu $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$, ortopiroksenu $(\text{Mg,Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, klinopiroksenu $(\text{Mg,Fe,Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, skalenii sodowo-wapniowych, plagioklazów tworzących szereg kryształów mieszanych pomiędzy albitem $(\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8])$ i anortytem $(\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8])$, kamacytu $\alpha\text{-FeNi}$, taenitu $\gamma\text{-FeNi}$, tetrataenitu FeNi , troilitu FeS , chromitu FeCr_2O_4 , ilmenitu FeTiO_3 , merylitu $\text{Ca}_{18}\text{Na}_2\text{Mg}_2(\text{PO}_4)_{14}$, chlorohydroksylapatytu $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH,Cl})$ oraz miedzi Cu (Karwowski 2012). Obecność oliwinu, piroksenu, plagioklazu, troilitu oraz kamacytu potwierdzono za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej (Szurgot i Polański 2013a), a obecność i zawartość troilitu za pomocą techniki DSC (Szurgot i in. 2012). Widmo EDS oliwinu jest pokazane na rysunku 3.

Zidentyfikowane w chondrycie Soltmany minerały są podstawowymi oraz akcesorycznymi składnikami chondrytów zwyczajnych (Krinov 1960, Mason 1962; Wood 1968; McCall 1973; Vdovykin 1974, Dodd 1981, Wasson 1985; Heide i Wlotzka 1995; Rubin 1997; Brearley i Jones 1998; McSween 1999; Norton 2002; Przylibski i in. 2003; Hutchison 2004; Manecki 2004; Sears 2004; Hurnik i Hurnik 2005; Szurgot 2008; Szurgot i in. 2008; Szurgot i in. 2009; Manecki 2010a, b; Szurgot 2011; Manecki 2013; Szurgot i Polański 2013b; Szurgot i in. 2013c).



Rys. 2. Widmo EDS chondrytu Solitany z mikroobszaru o powierzchni 3×2 mm ujawniające średni skład pierwiastkowy meteorytu.



Rys. 3. Widmo EDS oliwiny, głównego mineralu chondrytu Solitany.

W celu określenia wartości A_{mean} wykorzystano następujące zależności opierając się na średnim składzie pierwiastkowym meteorytów: chondrytu Solitany (Przylibski i Łuszczek 2012), składzie chondrytów zwyczajnych (Hutchison 2004) i składzie chondrytów L6 (Mason 1979):

$$A_{mean} = 1 / \sum(w_i / A_i), \quad (3)$$

$$A_{mean} = \sum(N_i / N) \cdot A_i, \quad (4)$$

gdzie w_i (% wag.) to część wagi meteorytu pochodząca od i -go pierwiastka tworzącego chondryt, albo od i -go tlenku, N_i/N (% atom.) to część atomowa i -go pierwiastka i tlenku, N_i to ilość atomów i -go pierwiastka, N to ilość wszystkich atomów $N = \sum N_i$, a A_i to ciężar atomowy/masa atomowa i -go pierwiastka, i /lub średni ciężar atomowy i -go tlenku. Jeśli znamy zawartość wszystkich pierwiastków tworzących meteoryt lub pierwiastków tworzących większy obiekt kosmiczny (planetę, planetoidę, księżyc) spełnione są następujące zależności:

$$\sum wi = 1, \quad (5)$$

$$\sum(Ni/N) = 1. \quad (6)$$

Średni ciężar atomowy pierwiastków A_i , tlenków A_i , minerałów A_{mean} oraz meteorytów A_{mean} jest wielkością bezwymiarową, podobnie jak względna masa atomowa pierwiastków.

Gdy dane eksperymentalne lub teoretyczne nie obejmują wszystkich pierwiastków stanowiących meteoryt lub inny badany obiekt, tj. gdy: $\sum wi \neq 1$ lub $\sum Ni/N \neq 1$, zamiast równań (5) i (6) mamy nierówności:

$$\sum wi < 1, \quad (7)$$

$$\sum Ni < N. \quad (8)$$

Wtedy dla określenia A_{mean} stosujemy zależności:

$$A_{mean} = \sum wi / \sum(wi/A_i), \quad (9)$$

$$A_{mean} = \sum(Ni/N) \cdot A_i / \sum(Ni/N). \quad (10)$$

Oznacza to, że równania (9) i (10) są ogólne, a równania (3) i (4) są przypadkami szczególnymi. Gdy nie znamy zawartości pewnych pierwiastków, to wartości A_{mean} wyznaczone za pomocą równań (9) i (10) są nieco mniej dokładne, ale realne jeśli wkład głównych pierwiastków tworzących meteoryt jest uwzględniony.

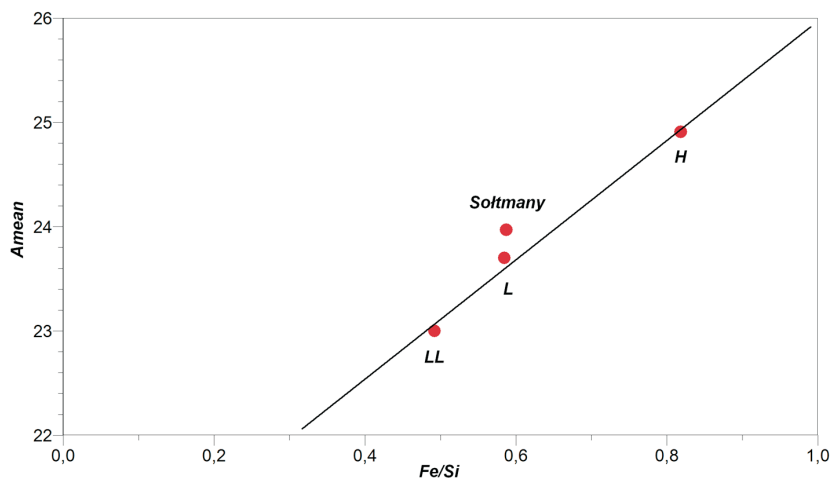
Tabela 1 prezentuje skład pierwiastkowy, wartości wi (% wag.), wartości Ni/N (% at.) oraz wartości A_{mean} obliczone stosując równania (3) oraz 9 i dane eksperymentalne Przylibskiego i Łuszczek (Przylibski i Łuszczek 2012) o średnim składzie pierwiastkowym meteorytu Sołtmany. Obliczenia te pokazują, że średni ciężar atomowy A_{mean} meteorytu Sołtmany wynoszący $A_{mean} = 23,97$, jest bliski średniemu ciężarowi atomowemu chondrytów grupy L (23,70). Obliczenia autora dla grupy L, LL i H chondrytów zwyczajnych o składzie chemicznym zamieszczonym w monografii Hutchisona (Hutchison 2004) dają wartości $A_{mean} = 23,70$ dla chondrytów L, $A_{mean} = 23,00$ dla chondrytów LL oraz $A_{mean} = 24,91$ dla chondrytów H. Dane te wskazują, że chondryt Sołtmany powinien być sklasyfikowany jako chondryt grupy L, jak wcześniej ustalono (Karwowski i in. 2011, Karwowski 2012; Przylibski i Łuszczek 2012; Rochette i in. 2012, Szurgot i in. 2012).

Rysunek 4 prezentuje zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} oraz stosunkiem atomowym Fe/Si dla trzech grup chondrytów zwyczajnych: LL, L i H oraz meteorytu Sołtmany. Zależność ta jest liniowa i można ją opisać równaniem:

$$A_{mean} = (5,72 \pm 0,52) \cdot (Fe/Si)_{at} + (20,25 \pm 0,34), \quad (11)$$

dla którego współczynnik korelacji $R^2 = 0,996$, a średni błąd kwadratowy $RSME = 0,12$. Rysunek 4 pokazuje, że chondryt Sołtmany jest najprawdopodobniej reprezentantem grupy L chondrytów.

Równanie (11) powinno być przydatne w klasyfikacji chondrytów zwyczajnych. Przewiduje ono, że dla $Fe/Si = 0$, tj. dla chondrytu bez żelaza $A_{mean} = 20,25 \pm 0,34$, co jest bliskie wartości forsterytu $A_{mean} = 20,10$ oraz bliskie wartości enstatytu



Rys. 4. Zależność pomiędzy średnim ciężarem atomowym A_{mean} oraz stosunkiem atomowym Fe/Si dla chondrytów zwyczajnych LL, L oraz H i meteorytu Softmany.

$A_{mean} = 20,08$. Dla bardzo dużej zawartości żelaza, np. $Fe/Si = 1$ równanie (11) daje wartość $A_{mean} = 25,97$.

Czy zależność (11) jest prawdziwa także dla innych grup chondrytów? Jeśli tak, to można ją wykorzystać dla przewidywania wartości A_{mean} znając wartości stosunku atomowego Fe/Si . Zgodnie z danymi Hutchisona chondryty enstatytowe EL mają $Fe/Si = 0,5934$, a chondryty enstatytowe EH stosunek $Fe/Si = 0,8730$ (Hutchison 2004). Przewidywanie wykorzystujące równanie (11) dla chondrytów enstatytowych EL prowadzi do wartości $A_{mean} = 23,64$, a dla grupy EH do wartości $A_{mean} = 25,24$. Dla chondrytów zwyczajnych grupy LL $Fe/Si = 0,4913$ mamy $A_{mean} = 23,06$, dla grupy L $Fe/Si = 0,5838$ mamy $A_{mean} = 23,59$, a dla grupy H $Fe/Si = 0,8177$ mamy $A_{mean} = 24,92$. Oznacza to, że dla obu grup chondrytów: chondrytów zwyczajnych i chondrytów enstatytowych są to poprawne przewidywania.

Niestety równanie (11) zastosowane dla chondrytów węglistych CI, dla których zgodnie z danymi Hutchisona $Fe/Si = 0,8719$ otrzymywana jest zbyt duża wartość $A_{mean} = 25,24$. Zgodnie z wynikami Andersona chondryty węgliste CI mają $A_{mean} = 24$ (Anderson 1989), a więc wyraźnie mniejszą wartość A_{mean} . Zapewne wynika to z innego uszeregowania pierwiastków chemicznych w chondrytach węglistych, niż przewidują to nierówności (1) i (2) dobrze spełnione dla chondrytów zwyczajnych i enstatytowych. Mniejsza wartość A_{mean} dla chondrytów węglistych wynika zapewne z większego procentowego udziału w ich składzie chemicznym lekkiego pierwiastka C ($A = 12,011$) oraz obecności w nich H_2O ($A = 6,005$).

Dla chondrytu Softmany przewidywane równaniem (11) A_{mean} jest poprawne. Ponieważ dla Softman $Fe/Si = 0,5876$, daje to $A_{mean} = 23,61$. Dane o składzie chemicznym dają bardzo bliską przewidywanej wartości $A_{mean} = 23,97$ (tab. 1). Jest ona, jak to zobrazowano na rysunek 4 tylko 1,5% większa niż wartość przewidywana.

Tabela 1. Zawartość pierwiastków w chondrycie Soltmany (% wagowe) (Przylibski i Łuszczek 2012) oraz współczynniki do obliczenia A_{mean} chondrytu Soltmany.

Pierwiastek	A_i	w_i (% wag.)	W_i (% at.)	$(w_i/A_i)^*$	A_{mean}	$(A_{mean}/A_i)^{**}$
Si	28,086	18,83	16,07	0,67		0,853
Ti	47,867	0,07	0,035	0,00146		0,5
Al	26,982	1,18	1,05	0,0437		0,8885
Cr	51,996	0,39	0,18	0,0075		0,461
Fe	55,845	22,0	9,44	0,3939		0,4293
Mn	54,938	0,27	0,12	0,0049		0,436
Mg	24,305	14,73	14,53	0,606		0,986
Ca	40,078	1,37	0,82	0,034		0,598
Na	22,99	0,73	0,76	0,0317		1,043
K	39,098	0,09	0,055	0,0023		0,613
P	30,974	0,12	0,09	0,00387		0,774
Ni	58,693	1,59	0,65	0,02709		0,408
Co	58,933	0,059	0,02	0,001		0,406
S	32,066	2,12	1,58	0,066		0,748
C	12,011	0,03	0,06	0,00249		1,996
O	16	36,39	54,52	2,274		1,50
		$\Sigma = 99,97$	$\Sigma = 99,98$	$\Sigma = 4,17124$	23,974 [#]	
					23,966 ^{##}	

[#] A_{mean} ze wzoru (3), w którym licznik $1 = 100\%$, ^{##} A_{mean} ze wzoru (9), w którym $\Sigma w_i = 99,97\%$. * składniki wymagane do obliczenia A_{mean} (patrz wzory (3) i (9)).

** składniki wymagane do obliczenia zawartości pierwiastków w procentach atomowych (czwarta kolumna tabeli) ze wzoru W_i (% at.) = w_i (% wag.) · (A_{mean}/A_i) . $\Sigma = \text{suma}$.

Badania materii planetarnej i materii Księżyca umożliwiły Szurgotowi odkrycie kilku ważnych zależności pomiędzy średnim ciężarem atomowym i innymi właściwościami fizycznymi (Szurgot 2015a). Są one bardzo użyteczne, także dla badań materii meteorytów, w tym dla chondrytu Soltmany.

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

$$A_{mean} = (7,51 \pm 0,13) \cdot d + (-2,74 \pm 0,55), \quad (12)$$

dla którego współczynnik korelacji $R^2 = 0,99$, a średni błąd kwadratowy $RMSE = 0,54$ (Szurgot 2015a). Dla meteorytów gęstość niesprężona to gęstość ziaren w warunkach normalnych. Równanie (12) pozwala określić A_{mean} znając gęstość ziaren d .

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

$$d = (0,133 \pm 0,002) \cdot A_{mean} + (0,37 \pm 0,07), \quad (13)$$

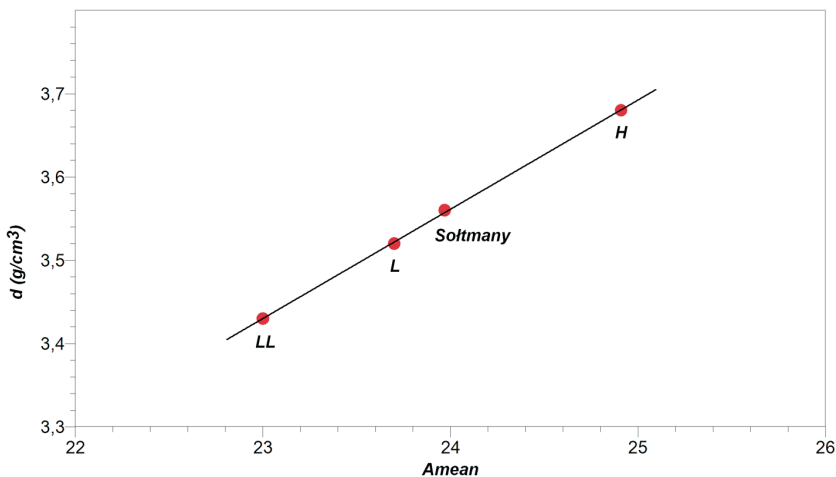
dla którego średni błąd kwadratowy wynosi $RMSE = 0,07$ (Szurgot 2015a). Stosując równanie (13) można określić gęstość ziaren d wykorzystując uprzednio określoną wartość A_{mean} .

Podstawienie do równania (13) wartości $A_{mean} = 23,97$ daje dla chondrytu Sołtmany gęstość ziaren $d = (3,56 \pm 0,12)$ g/cm³, która jest około 4% niższa niż wartość 3,72 g/cm³ określona wcześniej przez autora i współpracowników w oparciu o pomiary porowatości (Szurgot i in. 2012). Można zauważyć, że górna granica przewidywanej gęstości ziaren $d = 3,68$ g/cm³ jest już wartością bliską wartości eksperymentalnej wynikającej z porowatości meteorytu Sołtmany.

Pomiary Macke dla spadków chondrytów L dały średnią wartość gęstości ziaren $d = 3,58$ g/cm³, dla spadków chondrytów LL dały średnią wartość gęstości ziaren $d = 3,52$ g/cm³, a dla spadków chondrytów H średnią wartość gęstości ziaren $d = 3,71$ g/cm³ (Macke 2010). Zbliżone do wyżej wymienionych wartości gęstości ziaren otrzymali Consolmagno, Britt i Macke (Consolmagno i in. 2008). Dla spadków chondrytów grupy L otrzymali oni wartość $d = 3,56$ g/cm³. Dane Consolmagno i współpracowników oraz dane Macke wskazują, że wartość $d = 3,56$ g/cm³ gęstości ziaren meteorytu Sołtmany przewidziana równaniem (13) jest bardzo bliska średniej gęstości ziaren chondrytów L określonej precyzyjnie z wykorzystaniem helowego piknometru gazowego (Consolmagno i in. 2008; Macke 2010). Oznacza to, że równanie (13) i pomiary Macke oraz Consolmagno i współpracowników jednoznacznie określają Sołtmany jako reprezentanta chondrytów L.

Podstawienie do równania (13) wartości $A_{mean} = 23,70$ daje dla chondrytów L gęstość ziaren $d = (3,52 \pm 0,12)$ g/cm³, podstawienie wartości $A_{mean} = 23,0$ daje dla chondrytów LL gęstość ziaren $d = (3,43 \pm 0,12)$ g/cm³, a podstawienie wartości $A_{mean} = 24,91$ daje dla chondrytów H gęstość ziaren $d = (3,68 \pm 0,12)$ g/cm³. Również te obliczenia pokazują, że Sołtmany to chondryt należący do grupy L.

Rysunek 5 prezentuje zależność $d(A_{mean})$ wyrażoną równaniem (13). Pokazano na nim punkty charakterystyczne dla chondrytów zwyczajnych LL, L i H oraz chondrytu Sołtmany. Widać, że chondryt Sołtmany należy do grupy L chondrytów zwyczajnych.



Rys. 5. (a) Zależność $d(A_{mean})$ gęstości ziaren od średniego ciężaru atomowego opisana równaniem (13). Widać, że chondryt Sołtmany należy do grupy L chondrytów zwyczajnych.

Skład pierwiastkowy chondrytu Sołtmany został określony w pracy Przylibskiego i Łuszczek (Przylibski i Łuszczek 2012) i w poprzedniej współautorskiej pracy (Szurgot i Polański 2013a). Dane Przylibskiego i Łuszczek o zawartości pierwiastków wykorzystano do określenia masy poszczególnych minerałów oraz grup minerałów tworzących meteoryt. Tabela 2 prezentuje dane autora (Szurgot 2014) o masie krzemianów, kamacytu i troilitu chondrytu Sołtmany i dla porównania, dane o średniej zawartości minerałów w meteorycie Girgenti należącym do tej samej grupy i typu petrograficznego L6 chondrytów zwyczajnych (Keil 1962, Levi-Donati i Jarosevich 1972, Gastineau-Lyons i in. 2002).

Krzemiany w chondrycie Sołtmany (oliwiny, pirokseny i plagioklasy) zajmują 90% objętości meteorytu, a ich waga to 84,6% wagi meteorytu (Szurgot 2014). Waga metalu to 8%, a troilitu to 5,8% wagi meteorytu Sołtmany. Tabela 2 pokazuje, że chondryt Sołtmany składa się z następujących minerałów (% wag.): oliwin 48,1%, piroksen 26,3%, plagioklaz 10,2%, troilit 5,8%, kamacyt 6,1%, taenit 1,9%, (metal FeNi łącznie 8%), chromit 0,8%, merylit 0,6%, ilmenit 0,2% (Szurgot 2014). Szósta kolumna tabeli 2 prezentuje skład modalny chondrytu Sołtmany wyrażony w procentach objętościowych (% obj.): oliwin ~48%, pirokseny ~30%, plagioklasy ~12%, troilit ~4,5%, FeNi-metal ~3,5%, pozostałe minerały ~2%. Proporcje Opx i Cpx nie zostały rozdzielone i wymagają uzupełnienia.

Wyniki zamieszczone w tabeli 2 wykazują duże podobieństwo chondrytu Sołtmany do chondrytu L6 Girgenti. Zawartość troilitu w Sołtmanach (5,8% wag.) mieści się w zakresie określonym dla Girgenti (4,9–8,4% wag.). W chondrycie

Tabela 2. Zawartość krzemianów, faz metalicznych, głównie kamacytu, oraz troilitu w chondrycie Sołtmany i chondrycie Girgenti.

	Girgenti L6 (% wag.) (Gastineau- Lyon i in. 2002)	Girgenti L6 (% wag.) (Levi-Donati i Jarosevich 1972)	Girgenti L6 (% wag.) (Keil 1962)	Sołtmany L6 (% wag.) (Szurgot 2014)	Sołtmany L6 (% obj.) (Szurgot 2014)
Krzemiany	84,1		88,54	84,6	~90
Oliwiny	41,6	43,2		48,1	~48
Pirokseny	32,93	29,8		26,3	~30
Ortopiroksen	26,1				
Pigeonit	1,68				
Diopsyd	5,15				
Plagioklasy	9,55	10,9		10,2	~12
Metal	6,03	8,1	6,21	8	~3,5
Kamacyt	4,0			6,1	
Taenit	2,03			1,9	
Troilit	8,36	6,5	4,94	5,8*	~4,5**
Chromit	1,0	0,7	0,31	0,8	~2 [#]
Merylit				0,6	
Whitlockit	0,41				
Ilmenit	0	0,2		0,2	

[#] Łączna zawartość chromitu, merylitu oraz ilmenitu.

Sołtmany jest nieco więcej kamacytu niż w Girgenti, a w obu chondrytach jest więcej kamacytu niż troilitu. Stosunek wagi łącznej kamacytu i taenitu do troilitu w chondrycie Sołtmany wynosi 1,4 a w chondrycie Girgenti wynosi 0,7–1,2. Stosunek wagi oliwinów do piroksenów w Sołtmanach wynosi 1,8, a w chondrycie Girgenti wynosi 1,3–1,5. Sumaryczna zawartość akcesorycznych minerałów (chromitu, merylitu, whitlockitu i ilmenitu) jest w Sołtmanach nieco większa (1,6% wag.) niż w Girgenti (0,3–1,4% wag.).

Do określenia procentowego udziału poszczególnych minerałów w objętości chondrytu Sołtmany wykorzystywano, oprócz średniego składu pierwiastkowego, także wielkość powierzchni zajmowanej przez poszczególne minerały na obrazach BSE, i to zarówno na obrazach autora, jak i na obrazach opublikowanych przez Karwowskiego (Karwowski 2012). Wcześniej przeprowadzono skalowanie składu pierwiastkowego i mineralnego w wybranych punktach i obszarach meteorytu i ustalono jakiej barwie/stopniowi szarości odpowiada dany minerał. Analityczny mikroskop elektronowy umożliwił także mapowanie rozkładu pierwiastków.

Zawartość wagową troilitu dla meteorytu Sołtmany określono ze wzoru:

$$WFeS (\% \text{ wag.}) = WS \cdot (AFeS/AS), \quad (14)$$

gdzie $WS = 2,12\%$ wag. to zawartość siarki w meteorycie, $AS = 32,066$ to masa atomowa siarki, a $AFeS = 87,911$ to masa cząsteczkowa troilitu.

Objętość troilitu w meteorycie $VFeS/V\text{meteorytu}$ oszacowano z wielkości powierzchni troilitu na obrazach BSE, a także określono wykorzystując zależność:

$$VFeS/V\text{meteorytu} (\% \text{ obj.}) = WFeS \cdot (\rho\text{meteorytu}/\rho FeS), \quad (15)$$

gdzie $\rho\text{meteorytu}$ oraz ρFeS to gęstości meteorytu i troilitu ($\rho\text{meteorytu} = 3,475 \text{ g/cm}^3$, $\rho FeS = 4,74 \text{ g/cm}^3$).

Tabele 3 i 4 prezentują dane Karwowskiego (Karwowski 2012) o składzie tlenkowym wybranych minerałów chondrytu Sołtmany w wybranych mikroobszarach i obliczone średnie ciężary atomowe tych minerałów.

Znajomość zawartości minerałów w chondrycie Sołtmany umożliwia weryfikację średniego ciężaru atomowego tego chondrytu. Równanie (9) można przekształcić do postaci, w której składnikami meteorytu są nie pierwiastki i tlenki, ale minerały tworzące meteoryt. Taka interpretacja prowadzi do zależności:

$$\begin{aligned} \sum wi/Ai = woll/Aol + wpx/Apx + wpl/Apl + wka/Aka + wtae/Atae + wtr/Atr + \\ + wchr/Achr + wmer/Amer + wilm/Ailm = \sum wi/A\text{mean} = 1/A\text{mean}, \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie wi to część wagi meteorytu pochodząca od danego minerału, a Ai to średni ciężar atomowy/masa atomowa i -go minerału. Wskaźniki minerałów: ol = oliwin, px = piroksen, pl = plagioklaz, ka = kamacyt, tae = taenit, tr = troilit, chr = chromit, mer = merylit, ilm = ilmenit.

Podstawienie wartości liczbowych wielkości występujących w równaniu (16) daje postać:

$$\begin{aligned} 0,481/22,432 + 0,263/21,7 + 0,102/20,356 + 0,061/56,012 + 0,019/56,623 + \\ + 0,058/43,954 + 0,008/30,419 + 0,006/23,392 + 0,002/30,342 = 1/A\text{mean}, \end{aligned} \quad (17)$$

z której dla meteorytu Soltmany otrzymujemy $A_{mean} = 23,865$, co jest wartością bliską tej określonej ze składu pierwiastkowego ($A_{mean} = 23,97$). Do obliczeń wykorzystano dane w_i z tabeli 2 oraz wartości: $A_{ol} = 22,432$, $A_{px} = 21,7$, $A_{ka} = 56,012$, $A_{tae} = 56,623$, $A_{tr} = 43,954$, $A_{chr} = 30,419$, $A_{mer} = 23,392$, $A_{ilm} = 30,342$.

Wartości A_{ol} , A_{pl} , A_{chr} oraz A_{mer} wzięto z tabel 3, 4 i 6, wartości A_{ilm} , A_{tr} obliczono ze składu minerałów, wartości A_{ka} i A_{tae} obliczono ze składu tych minerałów (tab. 6) uzyskanych przez Karwowskiego (Karwowski 2012), wartość A_{px} oszacowano jako leżącą między ortopiroksenem ($A_{mean} = 21,437$) i klinopiroksenem ($A_{mean} = 22,000$) (tab. 6).

Skład tlenkowy wybranych minerałów określony przez Karwowskiego (Karwowski 2012) i wartości ich A_{mean} prezentowane są w tabelach 3, 4 i 6. Dane te pokazują wartości: $A_{ol} = 22,432$ (dla $Fo_{74,0}Fa_{25,45}Te_{0,52}$), $A_{pxlowCa} = 21,437$ (dla $En_{77,1}Fs_{21,4}Wo_{1,5}$), $A_{pxhighCa} = 22,000$ ($En_{47}Fs_{7,7}Wo_{45,3}$), $A_{pl} = 20,356$ ($Ab_{83,3}An_{10,8}Or_{5,8}$) oraz $A_{chr} = 30,446$.

Tabela 5 prezentuje średni ciężar atomowy wybranych minerałów meteorytów i minerałów ziemskich. Obliczeń dokonano wykorzystując wzory chemiczne mine-

Tabela 3. Zawartość tlenków w minerałach oliwinu, piroksenu niskowapniowego i wysokowapniowego oraz plagioklazu chondrytu Soltmany określona przez Karwowskiego (Karwowski 2012) i obliczone wartości średniego ciężaru atomowego tych minerałów.

Tlenek	Ai	wi (% wag.)	wi (% wag.)	wi (% wag.)	wi (% wag.)
		Oliwin	Piroksen nisko- -wapniowy	Piroksen wysoko- -wapniowy	Plagioklaz
		$Fo_{74,3}Fa_{25,2}Te_{0,5}$	$En_{77}Fs_{21,6}Wo_{1,4}$	$En_{47}Fs_{7,7}Wo_{45,3}$	$Ab_{84,4}An_{10,4}Or_{5,1}Cs_{0,04}$
SiO ₂	20,028	38,36	55,85	54,14	66,09
TiO ₂	26,622		0,19	0,51	
Al ₂ O ₃	20,392		0,12	0,47	21,33
Cr ₂ O ₃	30,397		0,09	0,82	
MgO	20,152	37,97	28,71	16,52	
CaO	28,039	0,06	0,70	22,11	2,14
MnO	35,472	0,46	0,50	0,30	
FeO	35,922	22,94	14,37	4,80	0,23
Fe ₂ O ₃	33,077		0,05	0,50	
NiO	37,346				
Na ₂ O	20,66			0,50	9,57
K ₂ O	31,397				0,88
V ₂ O ₃	29,976			0,09	
BaO	76,663				0,02
Σw_i		99,79	100,58	100,76	100,26
$\Sigma w_i/A_i$		4,4532	4,6699	4,5653	4,9201
A_{mean}		22,408	21,537	22,071	20,378

Tabela 4. Zawartość tlenków w merylicie i chlorohydroksylapatycie (Cl–OH apatycie) chondrytu Soltmany określona przez Karwowskiego (Karwowski 2012) i obliczone wartości średniego ciężaru atomowego tych minerałów.

Tlenek	Ai	wi (% wag.)	wi (% wag.)	wi (% wag.)	wi (% wag.)
		Chromit*	Chromit#	Merylit*	Cl–OH apatyt**
		FeCr ₂ O ₄	FeCr ₂ O ₄	Ca ₁₈ Na ₂ Mg ₂ (PO ₄) ₁₄	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,Cl)
TiO ₂	26,622	3,13	3,04		
Al ₂ O ₃	20,392	5,51	5,60		
Cr ₂ O ₃	30,397	55,66	55,48		
P ₂ O ₅	20,278			46,80	40,58
CaO	28,039			47,29	52,07
MgO	20,152	2,64	2,55	3,52	
Na ₂ O	20,66			2,82	0,46
FeO	35,922	27,51	27,66	0,81	0,48
Fe ₂ O ₃	33,077	3,42			
SiO ₂	20,028				0,08
MnO	35,472	0,63	0,71	0,02	0,07
H ₂ O	6,005				0,54
Cl	35,453				4,63
SO ₃	20,016				0,02
ZnO	40,695	0,33	0,26		
Σwi		98,83	98,97	101,26	98,93
Σwi/Ai		3,2461	3,2535	4,3288	4,1193
Amean		30,446	30,419	23,392	24,016

*1 pomiar, ** Średnia z 3 pomiarów. #Średnia z 7 pomiarów.

rałów oraz skład pierwiastkowy i skład tlenkowy minerałów podany w literaturze (Yudin i Kolemenskij 1987, Szurgot i Polański 2007, Szurgot i in. 2008, Ozawa i in. 2009, Szurgot i Polański 2011, Szurgot i in. 2011, Szurgot i Polański 2012, Szurgot 2013, Szurgot i Polański 2013b).

Aby obliczyć średni ciężar atomowy minerału wykorzystując wzór chemiczny minerału dzielono ciężar cząsteczkowy tego minerału przez ilość atomów w cząsteczce. Dla forsterytu Mg₂[SiO₄] oznacza to podzielenie ciężaru cząsteczkowego 140,696 przez 7 co prowadzi do wartości *Amean* = 20,099 podanej w tabeli 5.

Prezentowane w tabeli 5 wartości *Amean* minerałów wykorzystano do określenia i zanalizowania wartości *Amean* minerałów chondrytu Soltmany i innych meteorytów.

Tabela 5 pokazuje, że zakres wartości średniego ciężaru atomowego grupy oliwinu wynosi 20,1–29,1, grupy piroksenu 20,1–26,4, grupy skalenia 20,1–21,4, natomiast *Amean* fosforanów mieści się w przedziale 22,8–24,9. Minerale te wykazują względnie małe i porównywalne wartości *Amean*. Średnie wartości *Amean* wykazują: ilmenit (30,3), chromit (31,9) oraz troilit (43,9), natomiast duże *Amean* posiadają minerały żelazo-niklu: kamacyt (54,9), taenit (56,2) i tetrataenit (57,3).

Tabela 5. Średni ciężar atomowy wybranych minerałów meteorytów i minerałów ziemskich.

Minerał	Wzór chemiczny/udział molowy składników	Skrót	<i>Amean</i>
Forsteryt	Mg ₂ [SiO ₄]	Fo	20,099
Fajalit	Fe ₂ [SiO ₄]	Fa	29,110
Tefroit	Mn ₂ [SiO ₄]	Te	28,852
Monticellit	CaMg[SiO ₄]	Mo	22,353
Oliwin	(Mg,Fe) ₂ [SiO ₄]	Ol	20,1–29,1
	Fo89Fa11 (chondryty CO3.2, NWA 4967)	Ol	21,090
	Fo82Fa18, (chondryty H, NWA 4047)	Ol	21,721
	Fo76,5Fa23,5 (chondryty L)	Ol	22,217
	Fo76Fa24 (L6 Y74445)	Ol	22,278
	Fo70Fa30 (LL3.2 NWA 4560)	Ol	22,802
	Fo45Fa55 (CO3.2, NWA 4967)	Ol	25,055
Enstatyt	Mg ₂ [Si ₂ O ₆]	En	20,078
Ferrosilit	Fe ₂ [Si ₂ O ₆]	Fs	26,386
Wollastonit	Ca ₃ [Si ₃ O ₉]	Wo	23,233
Diopsyd	CaMg[Si ₂ O ₆]	Dio	21,655
Bronzyt	(Mg,Fe) ₂ [Si ₂ O ₆]		
	En75Fs20Wo5 (H4-6 NWA 4047)		22,024
	En81,9Fs16,7Wo1,4 (H5 El Hammami)		21,176
	En83,3Fs15,6Wo1,1 (H5 Burdett)*		21,097
	En82,7Fs16,2Wo1,1 (śred. 39 chondrytów)*		21,135
Hipersten	(Fe,Mg) ₂ [Si ₂ O ₆]	Hyp	
	En79Fs20Wo1 (L4 Gold Basin)		21,371
	En65,9Fs28,6Wo5,5 (SNC Chassigny)*		22,056
	En64Fs32Wo4 (LL3.2 NWA 4560)		22,223
	En78Fs20,6Wo1,4 (śred. 49 chondrytów)*		21,422
Pigeonit	(Mg,Fe ²⁺ ,Ca) ₂ [Si ₂ O ₆]	Pig	
Pigeonit	En36Fs58Wo6 (eukryt HaH 286)	Pig	23,926
	En37Fs55Wo8 (eukryt NWA 4039)	Pig	23,800
	En35Fs55Wo10 (eukryt HaH 286)	Pig	23,863
Chromit	FeCr ₂ O ₄	Chr	31,977
Ilmenit	FeTiO ₃	Ilm	30,342
Albit	NaAlSi ₃ O ₈	Ab	20,172
Anortyt	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	An	21,401
Ortoklaz	KAlSi ₃ O ₈	Or	21,411
Plagioklaz	Ab12An88 (eukryt HaH 286)	Plag	21,253
Oligoklaz	Ab84An10Or6 (L6)*	olig	20,369
Withlockit	Ca ₃ [PO ₄] ₂		23,860
Merylit	Ca ₁₈ Na ₂ Mg ₂ (PO ₄) ₁₄	mer	23,322
Chlorapatyt	Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl		24,798
Hydroksylapatyt	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)		22,832
Troilit	FeS	Tr	43,954
Kamacyt	Fe94,31Ni6,07Co0.61 (% wag.) (chondryty)*	Ka	54,933
Taenit	Fe59,5Ni41,1Cu0.07 (% wag.) (chondryty)*	Tae	56,223
Tetrataenit	Fe48Ni52 (% wag.)*	ttae	57,291

* Do obliczeń *Amean* tych minerałów wykorzystano dane o składzie chemicznym zestawione przez Yudina i Kolemenskij (Yudin i Kolemenskij 1987).

Można zauważyć, że w ramach tej samej grupy minerałów np. oliwinów i piroksenów wzrost zawartości ciężkiego pierwiastka w mineralu, głównie żelaza, prowadzi do większej wartości *Amean* mineralu. Dla oliwnu oznacza to, że wzrost zawartości fajalitu (Fa) w oliwinie powoduje wzrost wartości *Amean* oliwину, a dla piroksenu wzrost zawartości ferrosilitu (Fs) powoduje wzrost wartości *Amean* piroksenu.

Podobnie wygląda sytuacja dla meteorytów. Im więcej żelaza w meteorycie tym większy średni ciężar atomowy *Amean* meteorytu. Dla chondrytów zwyczajnych średnie wartości *Amean* grup LL, L oraz H spełniają związek:

$$A_{meanLL} < A_{meanL} < A_{meanH}, \quad (18)$$

pokazany na rysunku (4) i opisany równaniem (11). W równaniu (11) całkowita zawartość żelaza w meteorycie jest wyrażona przez stosunek atomowy *Fe/Si*. Oczywiście ważna jest zarówno całkowita zawartość żelaza obejmująca żelazo związane w minerałach i żelazo metaliczne, jak i zawartość kamacytu i taenitu w meteorycie, tj. minerałów, których głównymi składnikami są żelazo i nikiel.

Tabela 6 prezentuje średni ciężar atomowy minerałów chondrytu Sołtmany, obliczony z danych składu tych minerałów określonego przez Karwowskiego (Karwowski 2012). W kolumnie trzeciej zamieszczono wartości *Amean* obliczone ze wzoru chemicznego mineralu lub sumarycznego wzoru prezentującego skład/zawartość molową (atomową) składnika w mineralu. Oznaczono je jako *Amean**. W kolumnie czwartej tabeli 6 zamieszczono wartości *Amean* obliczone ze składu minerałów określonego przez Karwowskiego (Karwowski 2012), które oznaczono jako *Amean***. Tam, gdzie obliczono obie wartości *Amean** oraz *Amean*** dla tego samego mineralu występuje dobra zgodność między nimi (tab. 6).

Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 6 średni ciężar atomowy *Amean* minerałów chondrytu Sołtmany można uszeregować następująco:

$$A_{Plag} < A_{Hyp} < A_{Dio} < A_{Ol} < A_{mer} < A_{ap} < A_{Chr} < A_{Ilm} < A_{Tr} < A_{Ka} < A_{Tae} < A_{taet} < A_{Cu}. \quad (19)$$

W tabeli 7 zestawiono skład mineralny chondrytu L6 Sołtmany i skład mineralny chondrytu L6 Jesenice oraz wartości *Amean* ich minerałów. Dane te pokazują, że zarówno skład mineralny jak i średnie ciężary atomowe *Amean* minerałów obu tych chondrytów są bardzo zbliżone. Względne różnice w wartościach *Amean* minerałów tych meteorytów ($\Delta A/A$) mieszczą się w granicach 0,05–3%, najczęściej są rzędu 0,1–0,2%, tj. bardzo małe. Dowodzi to, że chondryt Sołtmany podobnie jak wcześniej spadły chondryt Jesenice należą do tej samej grupy, tj. do grupy L6 chondrytów zwyczajnych.

Nierówność (19) opisuje zarówno minerały chondrytu Sołtmany jak i minerały chondrytu Jesenice. Najmniejszą wartość *Amean* wykazuje plagioklaz obu meteorytów, trochę większą wartość *Amean* mają kolejno pirokseny: hipersten i diopsyd, następnie oliwin, merylit, apatyt, chromit, ilmenit, troilit, kamacyt i taenit. Danym o obecności i składzie tetrataenitu i miedzi rodzimej nie podano dla chondrytu Jesenice, ale na podstawie zawartości minerałów w chondrycie Sołtmany to właśnie one wykazują największą wartość *Amean*, chociaż zawartość tych minerałów jest w Sołtmanach bardzo mała.

Tabela 6. Średni ciężar atomowy minerałów chondrytu Sołtmany.

Minerał	Wzór chemiczny (udział molowy składników)	<i>Amean</i> * obliczone z atomowej/molowej zawartości składników	<i>Amean</i> ** obliczone ze składu tlenkowego (Karwowski 2012)
Oliwin	Fo74,3Fa25,2Te0,5	22,414	22,408
Śred. z 17 pomiarów	Fo74,0Fa25,45Te0,52	22,432	
Hipersten (Opx)	En77Fs21,6Wo1,4	21,485	21,537
Śred. z 15 pomiarów	En77,1Fs21,4Wo1,5	21,475	
MBD [#]	En76,6Fs21,9Wo1,5	21,507	
Diopsyd (Cpx)	En47Fs7,7Wo45,3	21,993	22,071
Śred. z 15 pomiarów	En46,9Fs7,8Wo45,3	22,000	
Plagioklaz			20,378
Śred. z 15 pomiarów	Ab83,3An10,8Or5,8	20,356	
Troilit	FeS	43,954	
Chromit	FeCr ₂ O ₄	31,977	30,419
Merylit	Ca ₁₈ Na ₂ Mg ₂ (PO ₄) ₁₄	23,322	23,392
Apatyt	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,OH,Cl)		24,016
Ilmenit	FeTiO ₃	30,342	
Kamacyt (% at.)	Fe94,2Ni5,1Co0.7	56,012	
Taenit (% at.)	Fe72,7Ni27Co0.3	56,623	
Tetratenit (% at.)	Fe52Ni48	57,212	
Miedź (% at.)	Cu94,07Fe3,9Ni2,03	63,147	

* Ze wzoru chemicznego minerału lub sumarycznego wzoru prezentującego skład/zawartość molową (atomową) składnika w mineralu. ** Ze składu tlenkowego minerału określonego przez Karwowskiego (Karwowski 2012). W kolumnie drugiej tłustym drukiem zaznaczono skład określony jako średnia wielu pomiarów. Kolumna czwarta prezentuje *Amean* z pojedynczych pomiarów. [#] Hipersten według Meteoritical Bulletin Database.

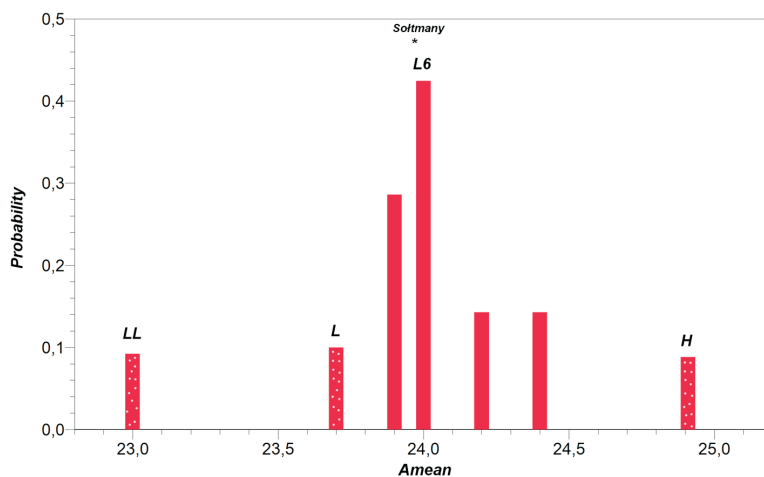
W celu porównania wartości *Amean* chondrytu Sołtmany i wartości *Amean* innych chondrytów zwyczajnych L6 przeprowadzono obliczenia średniego ciężaru atomowego innych chondrytów należących do typu petrograficznego L6. Tabela 8 prezentuje wartości średniego ciężaru atomowego wybranych chondrytów typu petrograficznego L6, chondrytu Sołtmany i chondrytów grupy L. Obliczenia *Amean* przeprowadzono w oparciu o średni skład pierwiastkowy/tlenkowy chondrytów (Przylibski i Łuszczek 2012, Bischoff i in. 2011, Mason 1979) oraz wykorzystując związek pomiędzy *Amean* i stosunkiem (*Fe/Si*)_{at} (równanie (11)). Wartości otrzymane z wykorzystaniem składu chemicznego oznaczono jako *Amean*^{*}, natomiast otrzymane w oparciu o stosunek *Fe/Si* oznaczono jako *Amean*^{**}.

Wyniki zamieszczone w tabeli 8 pokazują, że stosunek atomowy *Fe/Si* dla chondrytu Sołtmany wynosi 0,588, a dla chondrytów L6 jest równy 0,598±0,036. Wartość *Amean*^{*} dla meteorytu Sołtmany wynosi 23,974, a dla chondrytów L6 24,064±0,159, natomiast *Amean*^{**} dla meteorytu Sołtmany wynosi 23,61±0,65, a dla chondrytów L6 to 23,67±0,20. Dane te jednoznacznie określają chondryt Sołtmany jako reprezentanta chondrytów L6.

Tabela 7. Średni ciężar atomowy minerałów chondrytu Soltmany (L6, S2, W0) i minerałów chondrytu Jesenice (L6, S3, W0/1).

Minerał	Wzór chemiczny (zawartość molowa minerału)	<i>Amean</i> Soltmany L6	<i>Amean</i> Jesenice L6	ΔA_{mean} ; $\Delta A/A$ (%)
Oliwin	Fo74,0Fa25,45Te0,52	22,432		0,71; 3%
	Fo74,9Fa25,1 [#]		22,361 [#]	
Hipersten (Opx)	En77,1Fs21,4Wo1,5	21,435		0,02; 0,1%
	En77,4Fs21,1Wo1,5		21,456	
Diopsyd (Cpx)	En46,9Fs7,8Wo45,3	22,000		0,024; 0,1%
	En46,5Fs8,2Wo45,3		22,024	
Plagioklaz	Ab83,3An10,8Or5,8	20,356		0,023; 0,1%
	Ab83,2An11,1Or5,7		20,379	
Troilit	FeS	44,048		
Chromit	FeCr ₂ O ₄	31,977 (30,419)	(30,479)	0,06; 0,2%
Merylit (Whitlockit)	Ca ₁₈ Na ₂ Mg ₂ (PO ₄) ₁₄	23,322 (23,392)	(23,258)	0,13; 0,05%
Apatyt	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,OH,Cl)	(24,016)	(24,334)	0,32; 1,3%
Ilmenit	FeTiO ₃	30,342		
Kamacyt	Fe94,2Ni5,1Co0,7 (% at.)	56,012		0,03; 0,05%
	Fe92,8Ni6Co1,2 (% wag.)		(56,043)	
Taenit	Fe72,7Ni27Co0,3 (% at.)	56,623		0,07; 1,2%
	Fe69,3Ni30Co0,7 (% wag.)		(56,691)	
Tetratenit	Fe52Ni48 (% at.)	57,212		
Miedź (% at.)	Cu94,07Fe3,9Ni2,03	63,147		

() Ze składu tlenkowego minerału. [#]Jesenice, pochyty druk



Rys. 6. Rozkład wartości *Amean* dla grupy chondrytów L6. Na rysunku pokazano średnie wartości średniego ciężaru atomowego trzech grup chondrytów zwyczajnych: LL, L oraz H, którym umownie przypisano jednakowe wartości prawdopodobieństwa 0,1. Wartość *Amean* = 23,97 dla chondrytu Soltmany pokazano gwiazdką. Widać, że średni ciężar atomowy meteorytu Soltmany jest w maksimum rozkładu grupy L6, co świadczy, że należy on do grupy L6.

Tabela 8. Średni ciężar atomowy wybranych chondrytów typu petrograficznego L6, chondrytu L6 Sołtmany i chondrytów grupy L. Obliczenia A_{mean} przeprowadzono w oparciu o średni skład pierwiastkowy/tlenkowy chondrytów (A_{mean}^*): Sołtmany (Przylibski i Łuszczek 2012), Jesenice (Bischoff i in. 2011), pozostałe chondryty (Mason 1979). Wartości A_{mean}^{**} obliczono wykorzystując stosunek (Fe/Si) $_{at}$ i równanie (11).

Chondryt	(Fe/Si) $_{at}$	A_{mean}^*	A_{mean}^{**}
Sołtmany L6	0,588	23,974	23,61±0,65
Jesenice L6	0,646	24,370	23,94±0,68
Girgenti L6	0,533	23,935	23,30±0,62
Leedey L6	0,616	24,030	23,77±0,66
Bruderheim L6	0,613	24,188	23,76±0,66
Holbrook L6	0,579	23,949	23,56±0,64
Modoc L6	0,614	24,000	23,76±0,66
Zakres dla L6	0,533–0,646	23,935–24,370	23,30–23,94
Średnia dla L6±SD	0,598±0,036	24,064±0,159	23,67±0,20
Chondryty L (Hutchison 2004)	0,584	23,703	23,59±0,64
Chondryty L (McSween i Huss 2010)	0,589	23,674	23,62±0,65

Sołtmany to oczywiście przedstawiciel grupy L, o czym świadczą dane dotyczące grupy L. Zgodnie z tabelą 8 dla chondrytów L mamy: $Fe/Si = 0,584–0,598$, $A_{mean}^* = 23,674–23,703$ oraz $A_{mean}^{**} = 23,61±0,65$.

Rysunek 6 prezentuje rozkład wartości A_{mean} dla grupy chondrytów L6. Pokazano na nim także średnie wartości średniego ciężaru atomowego trzech grup chondrytów zwyczajnych: LL, L oraz H, którym umownie przypisano jednakowe wartości prawdopodobieństwa 0,1. Wartość A_{mean} dla chondrytu Sołtmany pokazano gwiazdką. Widać, że średni ciężar atomowy meteorytu Sołtmany $A_{mean} = 23,97$ jest w maksimum rozkładu grupy L6 ($A_{mean} = 24,00$), co świadczy, że należy on do grupy L6.

Wnioski

Niniejsza praca prezentuje wyniki badań średniego ciężaru atomowego meteorytu Sołtmany, meteorytów grupy L6: Jesenice, Girgenti, Leedey, Bruderheim, Holbrook i Modoc oraz średniego ciężaru atomowego wybranych minerałów pozaziemskich, w tym minerałów chondrytu Sołtmany i chondrytu Jesenice.

1. W oparciu o dane składu chemicznego meteorytów zamieszczone w literaturze i związki wyprowadzone przez autora określono średni ciężar atomowy A_{mean} tych meteorytów. Sołtmany: 23,974, Jesenice: 24,370, Girgenti: 23,935, Leedey: 24,030, Bruderheim: 24,188, Holbrook: 23,949, Modoc: 24,000.
2. W oparciu o literaturowe dane o składzie chemicznym meteorytów i związki wyprowadzone przez autora określono średni ciężar atomowy A_{mean} trzech

- grup chondrytów zwyczajnych LL, L oraz H. Otrzymano następujące wartości *Amean*: grupa LL: 23,00, grupa L: 23,70, grupa H: 24,91.
3. Przedstawiono wiele nowych dowodów potwierdzających przynależność chondrytu Sołtmany nie tylko do grupy L chondrytów zwyczajnych, ale do typu petrograficznego L6 tych chondrytów, jak uprzednio sklasyfikowano ten chondryt (Karwowski i in. 2011, Karwowski 2012).
 4. Otrzymano zależność umożliwiającą określenie średniego ciężaru atomowego meteorytu *Amean* w oparciu o pomiary stosunku atomowego *Fe/Si* (równanie (2)). Określony z tej zależności ciężar atomowy chondrytu Sołtmany (*Amean* = 23,61±0,65) jest bliski średniej wartości *Amean* dla chondrytów grupy L i bliski średniej wartości *Amean* dla chondrytów typu petrograficznego L6, wynikającej z równania (2), tj. *Amean* = 23,67± 0,20.
 5. Ustalono, że średni ciężar atomowy meteorytu Sołtmany *Amean* = 23,97 jest w maksimum rozkładu grupy L6 (*Amean* = 24,00) (rys. 6).
 6. Ustalono, że stosunek atomowy *Fe/Si* dla chondrytu Sołtmany wynosi 0,588, a dla chondrytów L6 jest równy 0,598±0,036. Oznacza to, że chondryt Sołtmany jest reprezentantem chondrytów L6.
 7. Określono średni ciężar atomowy minerałów pozaziemskich obecnych w chondrytach zwyczajnych. Zakres wartości średniego ciężaru atomowego grupy oliwinu wynosi 20,1–29,1, grupy piroksenu 20,1–26,4, grupy skalenia 20,1–21,4, natomiast *Amean* fosforanów mieści się w przedziale 22,8–24,9. Minerale te wykazują względnie małe i porównywalne wartości *Amean*. Średnie wartości *Amean* wykazują: ilmenit (30,3), chromit (31,9) oraz troilit (43,9), natomiast duże *Amean* posiadają minerały żelazo-niklu: kamacyt (54,9), taenit (56,2) i tetrataenit (57,3).
 8. Ustalono, że w ramach tej samej grupy minerałów wzrost zawartości ciężkiego pierwiastka w mineralu, głównie żelaza, prowadzi do większej wartości *Amean* mineralu. Dla oliwinu oznacza to, że wzrost zawartości fajalitu (Fa) w oliwinie powoduje wzrost wartości *Amean* oliwinu, a dla piroksenu wzrost zawartości ferrosilitu (Fs) powoduje wzrost wartości *Amean* piroksenu. Podobnie wygląda sytuacja dla meteorytów. Im większa jest zawartość żelaza w meteorycie tym większy jest średni ciężar atomowy *Amean* meteorytu.
 9. Określono średni ciężar atomowy *Amean* minerałów chondrytu L6 Sołtmany i minerałów chondrytu L6 Jesenice. Otrzymano bardzo bliskie wartości *Amean* dla prawie wszystkich minerałów obu tych meteorytów.
 10. Wykorzystując wartości *Amean* minerałów chondrytu Sołtmany i zawartość minerałów w tym meteorycie (Szurgot 2014) oraz związek między składem modalnym meteorytu i wartościami *Amean* minerałów (równania (16) i (17)) zweryfikowano pozytywnie (*Amean* = 23,86) otrzymaną w oparciu o skład pierwiastkowy wartość ciężaru atomowego (*Amean* = 23,97) meteorytu Sołtmany.
 11. Wykorzystując odkrytą przez autora (Szurgot 2015a) zależność średniego ciężaru atomowego *Amean* od gęstości niesprężonej planet, która dla meteorytów jest gęstością ziaren, wprowadzono zależność pomiędzy gęstością ziaren

- i średnim ciężarem atomowym A_{mean} meteorytu (równanie (13)). Stosując równanie (13) można określić gęstość ziaren d wykorzystując uprzednio określoną wartość A_{mean} .
12. Wykorzystano równanie (13) dla skorygowania wartości gęstości ziaren chondrytu Sołtmany. Otrzymana wartość gęstości ziaren $(3,56 \pm 0,12)$ g/cm³ jest około 4% mniejsza niż wartość 3,72 g/cm³ określona wcześniej przez autora i współpracowników w oparciu o pomiary porowatości (Szurgot i in. 2012).
 13. Pokazano, że wartość $d = 3,56$ g/cm³ gęstości ziaren meteorytu Sołtmany przewidziana równaniem (13) jest bardzo bliska średniej gęstości ziaren chondrytów L określonej precyzyjnie przez Consolmagno i współpracowników oraz przez Macke z wykorzystaniem helowego piknometru gazowego (Consolmagno i in. 2008, Macke 2010). Oznacza to, że równanie (13) i precyzyjne pomiary eksperymentalne jednoznacznie określają Sołtmany jako reprezentanta chondrytów L.
 14. Wyniki prezentowane w tej pracy wykazują dużą użyteczność wykorzystywania średniego ciężaru atomowego w badaniach materii pozaziemskiej.

PODZIĘKOWANIA: Autor serdecznie dziękuje żonie mgr Jadwidze Szurgot za okazaną pomoc i konsultacje podczas badań oraz dr. Krzysztofowi Polańskiemu za wykonanie obrazów BSE meteorytu Sołtmany na mikroskopie elektronowym i pomiary EDS. Profesorowi Tadeuszowi Przylibskiemu autor wyraża wdzięczność za udostępnienie okazów meteorytu Sołtmany i zachętę do prowadzenia badań tego chondrytu oraz za wszystkie cenne uwagi i sugestie dotyczące prezentacji wyników badań.

Literatura

- Anderson D.L., 1989, *Theory of the Earth*, Blackwell, London.
- Bischoff A., Jersek M., Grau T., Mirtic B., Ott U., Kučera J., Horstmann M., Laubenstein M., Herrmann S., Řanda Z., Weber M., Heusser G., 2011, *Jesenice – a new meteorite fall from Slovenia*, *Meteoritics & Planetary Science*, 46, s. 793-804.
- Brearley A.J., Jones R.H., 1998, *Chondritic meteorites*, [w:] *Planetary Materials*, Papike J.J. (Ed.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Washington D.C. 36. 3-1-3-398.
- Consolmagno G.J., Britt D.T., Macke R.J., 2008, *The significance of meteorite density and porosity*, *Chemie der Erde* 68, s. 1–29.
- Dodd R.T., 1981, *Meteorites – A petrologic-chemical synthesis*, Cambridge.
- Gałązka-Friedman J., Szlachta K., 2012, *Mössbauer studies of Sołtmany meteorite – preliminary results*, *Meteorites*, 2, s. 73–77.
- Gastineau-Lyons H.K., McSween H.Y., Gaffey M.J., 2002, *A critical evaluation of oxidation versus reduction during metamorphism of L and LL group chondrites, and implications for asteroids spectroscopy*, *Meteoritics & Planetary Science*, 37, s. 75–89.
- Heide F., Wlotzka F., 1995, *Meteorites: messengers from space*, Springer. Berlin
- Hurnik B., Hurnik., 2005, *Materia kosmiczna na Ziemi, jej źródła i ewolucja*, Poznań.
- Hutchison R., 2004, *Meteorites-A petrologic, chemical and isotopic synthesis*, Cambridge.
- Karwowski Ł., Pilski A.S., Przylibski T.A., J. Gattacceca J., Rochette P., Łuszczek K., Kryza R., Woźniak B., Woźniak M., 2011, *A new meteorite fall at Sołtmany, Poland*, *Meteoritics & Planetary Science*, 46, Supplement, A5336–A5336.

- Karwowski Ł., 2012, *Sołtmany meteorite*, Meteorites, 2, s. 15–30.
- Keil K., 1962, *On the phase composition of meteorites*, J. Geoph. Res., 69, s. 4055–4061.
- Krinov E.L., 1960, *Principles of Meteoritics*, Pergamon, New York.
- Laubenstein M., Giampaoli A., Janowski P., Mietelski J.W., 2012, *Cosmogenic radionuclides in the Sołtmany (L6) meteorite*, Meteorites, 2, s. 45–51.
- Levi-Donati G.R., Jarosewich E., 1972, *Mineralogical and chemical researches on L chondrites: Girgenti*, Meteoritics, s. 109–125.
- Łuszczek K., Dalcher N., Leya I., 2012, *Cosmogenic and radiogenic noble gases in the Sołtmany L6 chondrite*, Meteorites, 2, s. 39–43.
- Macke R.J. 2010, *Survey of meteorite physical properties: density, porosity and magnetic susceptibility*, Ph.D. Thesis, University of Central Florida, Orlando.
- Maneck A., 2004, *Encyklopedia minerałów z polskim i angielskim słownikiem nazw. Minerality Ziemi i materii kosmicznej*, Kraków.
- Maneck A., 2010a, *Meteority. Oblicza gości z kosmosu*, Kraków.
- Maneck A., 2010b, *Meteorology, meteority, pramateria słoneczna i „kosmiczne” technologie*, Kraków.
- Maneck A., 2013, *Meteorotyka z elementami planetologii – glosariusz*, Kraków.
- Mason B., 1962, *Meteorites*, New York.
- Mason B., 1979, *Data on Geochemistry*, Chapter B. *Cosmochemistry*, Washington.
- McCall G.J.H., 1973, *Meteorites and their origins*, David and Charles, Devon.
- McSween H.Y. Jr, 1999, *Meteorites and their parent planets*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- McSween H.Y., Huss G.R., 2010, *Cosmochemistry*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Norton O.R., 2002, *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*, Cambridge.
- Ozawa S., Ohtani E., Miyahara M., Suzuki A., Kimura M., Ito Y., 2009, *Transformation textures, mechanisms of formation of high-pressure minerals in shock melt veins of L6 chondrites, and pressure-temperature conditions of the shock events*, Meteoritics & Planetary Science, 44, s. 1771–1786.
- Przylibski T.A., Łuszczek K., 2012, *Bulk chemical composition of Sołtmany chondrite*, Meteorites, 2, s. 31–37.
- Przylibski T.A., Piłski A.S., Zagrozdżon P.P., Kryza R., 2003, *Petrology of the Baszkówka L5 chondrite: A record of the surface-forming processes on the parent body*, Meteoritics & Planetary Science 38, s. 927–937.
- Rochette P., Gattacceca J., Lewandowski M., 2012, *Magnetic classification of meteorites and application to the Sołtmany fall*, Meteorites, 2, s. 67–71.
- Rubin A.E., 1997, *Mineralogy of meteorite groups*, Meteoritics & Planetary Science, 32, s. 231–247.
- Schmitt-Kopplin P., Harir M., Kanawati B., Tziozis D., Hertkorn N., Gabelica Z., 2012, *Chemical footprint of the solvent soluble extraterrestrial organic matter occluded in Sołtmany ordinary chondrite*, Meteorites, 2, s. 79–92.
- Sears D., 2004, *The origins of chondrules and chondrites*, Cambridge.
- Szlachta K., Woźniak M., Gałązka-Friedman, 2014, *Porównawcze badania mössbauerowskie meteorytów: Sołtmany (L6), Chelyabinsk (LL5) i Grzempy (H5)*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 5, s. 115–120.
- Szurgot M., 2008, *Kryształy w meteorytach*, [w:] *Kryształy w przyrodzie i technice. Przewodnik po świecie kryształów*, Wojtczak L., Ziomek J. (Eds.), Łódź, s. 209–230.
- Szurgot M., 2011. *On the specific heat capacity and thermal capacity of meteorites*. Lunar Planet. Sci.Conf., XXXXII: Abstract #1150.

- Szurgot M., 2013, *Badania składu pierwiastkowego, mineralnego i mikrostruktury wybranych eukrytów*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 4, s. 141–142.
- Szurgot M., 2014, *Modal abundance of minerals in Soltmany L6 chondrite*, Meteoritics & Planetary Science, 49 Suppl. 5031.pdf
- 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., Adamus A., Wach R.A., 2013a, *Estimation of fusion crust temperature of Soltmany meteorite*, Meteoritics & Planetary Science, 48 Suppl. 5033.pdf
- Szurgot M., Adamus A., Wach R.A., 2013b, *Troilite cosmo thermometer in Soltmany meteorite*, Meteoritics & Planetary Science, 48 Suppl. 5004.pdf
- Szurgot M., Kisiel R., Kisiel K., 2013c, *Identyfikacja minerałów meteorytu NWA 4505 za pomocą spektroskopii Ramana*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 4, s. 71–88.
- Szurgot M., Kisiel K., Pstrokońska R., 2009, *Identyfikacja minerałów meteorytu NWA 4047 za pomocą spektroskopii Ramana*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 1, s. 147–150.
- Szurgot M., Polański K., Kosiński J.W., 2011, *Badanie składu pierwiastkowego i mineralnego chondrytu węglistego NWA 4967 za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 2, s. 147–157.
- Szurgot M., Polański K., Krystek M., 2008, *Electron and optical microscopy studies of extraterrestrial materials in NWA 4047 meteorite*, Cryst. Res. Technol., 43, s. 656–665.
- Szurgot M., Polański K., 2007, *Microscopic investigations of Gold Basin and El Hammami chondrites*, Scientific Bulletin of the Technical University of Lodz, Physics, 1010, 28, s. 79–94.
- Szurgot M., Polański K., 2011, *Investigations of HaH 286 eucrite by analytical electron microscopy*, Meteorites, 1, s. 29–38.
- Szurgot M., Polański K., 2012, *Wyniki badań składu pierwiastkowego i mineralnego eukrytu NWA 4039 za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 3, s. 126–139.
- Szurgot M., Polański K., 2013a, *Skład pierwiastkowy meteorytu Soltmany*, 55 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, s. 304–305.
- Szurgot M., Polański K., 2013b, *Badania meteorytu NWA 4560 za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 4, s. 90–107.
- 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., Przylibski T.A., 2014, *Właściwości termofizyczne meteorytu Soltmany*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 5, s. 185–186.
- Vdovykin G.P., 1974, *Meteority*, Nauka, Moskwa.
- Wach R.A., Adamus A., Szurgot M., 2013, *Specific heat capacity of Soltmany and NWA 4560 meteorites*, Meteoritics & Planetary Science, 48 Suppl. 5017.pdf,
- Wasson J.T., 1985, *Meteorites, their record of early solar system history*, Freeman and Corp. New York.
- Wood J.A., 1968, *Meteorites and the origin of planets*, Mc Graw Hill, New York.
- Woźniak B., Woźniak M., 2012, *Account of circumstances surrounding the fall of a meteorite in Soltmany village*, Meteorites, 2, s. 9–14.
- Yudin I.A. Kolomenskij V.D. 1987, *Mineralogia meteoritov*, UNC AN SSSR, Sverdlovsk.