

Marian SZURGOT<sup>1</sup>

# Średni ciężar cząsteczkowy chondrytu Jezersko (H4). Promień i objętość atomu i cząsteczki chondrytu

Average molecular weight of Jezersko H4 chondrite. Radius and volume of atom and molecule of chondrite

**Abstract:** Average molecular weight  $\langle MW \rangle$  and average atomic number  $\langle Zmol \rangle$  of molecule of Jezersko ordinary chondrite (H4 S2(3) W2, find in 1992 in Slovenia) have been calculated using literature data on chemical composition of the meteorite (Miler et al. 2014).

It was shown that Jezersko's  $\langle MW \rangle = 55.58$ ,  $\langle Zmol \rangle = 27.21$ , and ratio  $\langle MW \rangle / \langle Zmol \rangle = 2.043$  for composition without water. Jezersko's silicates shown the values:  $\langle MWsi \rangle = 54.08$ ,  $\langle Zmol si \rangle = 21.77$ , and  $\langle MWsi \rangle / \langle Zmol si \rangle = 2.484$ .

Volume and radius of average Jezersko molecule, and of atom have been also determined. It was calculated that the average volume of Jezersko's molecule  $Vmol = 2.515 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ , and average radius of Jezersko's molecule  $Rmol = 181.5 \text{ pm}$ . Average volume of the Jezersko's atom  $Vatom = 1.117 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ , and average radius of Jezersko's atom:  $Ratom = 138.5 \text{ pm}$ . Ratio of average Jezersko's volume of molecule to atom volume: 2.25, and ratio of radius of molecule to radius of atom: 1.31.

Number of atoms in Jezersko meteorite average molecule  $Nmol = \langle MW \rangle / Amean = \langle Zmol \rangle / Zmean = 2.25$ , and for Jezersko's silicates  $Nsimol = 2.48$ .

**Keywords:** Jezersko chondrite, average molecular weight, average radius of molecule, average radius of atom

## Wstęp

Ciężar atomowy określa szereg właściwości fizycznych materiałów i jest ważnym parametrem fizycznym przydatnym do analizy geochemicznej i geologicznej obiektów kosmicznych, wykorzystywanym do analizy budowy wewnętrznej planet, planetoid i Księżyca (Birch 1961; Ringwood 1966; Anderson i Kovach 1967; Anderson i Jordan 1970; Anderson 1989; Maj 1998; Szurgot 2015a–d, 2017a–b, 2019, 2020). Ciężar cząsteczkowy, podobnie jak i ciężar atomowy jest niezmiernie ważną wielkością fizyczną, znajomość której jest niezbędna w badaniach materii ziemskiej i pozaziemskiej.

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

W przypadku bardziej złożonych obiektów w porównaniu z pierwiastkami, czy związkami chemicznymi, także minerałami, określa się średni ciężar atomowy i średni ciężar cząsteczkowy, a dotyczy to m.in. mieszanin, także powietrza, czy polimerów. Średni ciężar atomowy minerałów i skał ziemskich oraz skał pozaziemskich jest przedmiotem zainteresowań wielu badaczy materii pozaziemskiej, także zainteresowań autora.

Właściwości fizyczne meteorytów są przedmiotem intensywnych badań w wielu ośrodkach naukowych na świecie i dostarczają ważnych informacji o materii pozaziemskiej (Wilkison i Robinson 2000; Petrovic 2001; Britt i Consolmagno 2003; Rochette i in. 2003, 2008, 2012; Consolmagno i in. 2006, 2008; Kohout i in. 2008; Beech i in. 2009; Macke 2010; Macke i in. 2010, 2011, 2019; Kiefer i in. 2012; Opeil i in. 2012; Łuszczek i Wach 2014; Przylibski 2016; Bartoschewitz i in. 2017; Flynn i in. 2018; Ostrowski i Bryson 2019; Soini i in. 2020; Szurgot i in. 2012; Szurgot 2020).

Analiza materii minerałów i skał planet, planetoid i komet, wymaga znajomości nie tylko średniego ciężaru atomowego tych obiektów, ale także znajomości średniego ciężaru cząsteczkowego. Określenie średniego ciężaru cząsteczkowego meteorytów i gromadzenie danych o nim to pierwszy etap badań. Następnym etapem jest określenie wzajemnych związków pomiędzy ciężarem cząsteczkowym i różnymi właściwościami fizycznymi materii pozaziemskiej, podobnie jak to stwierdzono dla średniego ciężaru atomowego (Szurgot 2020). Zgodnie z wiedzą autora, dotychczas nie prowadzono badań średniego ciężaru cząsteczkowego meteorytów, w tym także chondrytów zwyczajnych.

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

Meteoryt Jezersko należy do względnie nowych, od niedawna badanych skał pozaziemskich. Chondryt ten znaleziono w roku 1992 w paśmie górskim Karawanki w Słowenii (Miler i in. 2014). Szczegółowe badania tego meteorytu pozwoliły na jego sklasyfikowanie jako średnio zszokowanego S2(3) chondrytu zwyczajnego H4 o umiarkowanym stopniu zwiertzenia W2 (Miler i in. 2014).

Celem prezentowanych badań było określenie i zanalizowanie średniego ciężaru cząsteczkowego  $\langle MW \rangle$  i średniej liczby atomowej  $\langle Z_{mol} \rangle$  cząsteczki meteorytu Jezersko, określenie średniej liczby atomów  $N_{mol}$  w średniej cząsteczce tego meteorytu oraz wyznaczenie objętości cząsteczki  $V_{mol}$  i promienia cząsteczki  $R_{mol}$  oraz objętości atomu  $V_{atom}$  i promienia atomu  $R_{atom}$ . Obliczenia przeprowadzono dla całej skały stanowiącej meteoryt Jezersko oraz jego części krzemianowej.

Wcześniejsze badania autora dotyczące meteorytu Jezersko objęły średni ciężar atomowy  $A_{mean}$ , średnią liczbę atomową  $Z_{mean}$ , gęstość ziaren  $d_{grain}$ , oraz wpływ stopnia zwiertzenia meteorytu na jego średni ciężar atomowy, stosunek atomowy  $Fe/Si$  oraz gęstość ziaren (Szurgot 2019). Przedmiotem zainteresowań autora było także ciepło właściwe  $C_p$  i ciepło atomowe  $C_{atom}$  tego chondrytu (Szurgot 2020).

## Metody badań

Praca ma profil teoretyczny. Obliczeń średniego ciężaru cząsteczkowego  $\langle MW \rangle$  całej skały meteorytu oraz jego części krzemianowej  $\langle MW_{Si} \rangle$  dokonano wykorzystując zależność stosowaną do obliczeń średniego ciężaru cząsteczkowego mieszanin ([https://en.wikipedia.org/wiki/Molar\\_mass](https://en.wikipedia.org/wiki/Molar_mass), <http://facstaff.cbu.edu/rprice/lectures/compos.html>).

Obliczenia objętości molekularnej  $V_{mol}$ , i objętości atomowej  $V_{atom}$  przeprowadzono wykorzystując gęstość ziaren tego chondrytu, natomiast obliczenia średnicy i promienia cząsteczki  $D_{mol}$ ,  $R_{mol}$  oraz średnicy i promienia atomu  $D_{atom}$ ,  $R_{atom}$  meteorytu Jezersko przeprowadzono zakładając kulisty kształt atomu i molekuly.

Do obliczeń wykorzystano skład tlenkowy meteorytu Jezersko przeliczony przez autora (Szurgot 2019) w oparciu o literaturowe dane eksperymentalne o średnim składzie pierwiastkowym tego chondrytu (Miler i in. 2014). Wyznaczoną przez Szurgota (2019) wartość gęstości ziaren  $d_{grain}$  tego chondrytu użyto do obliczeń liczby atomów w cząsteczce. Liczbę atomów w cząsteczce całej skały  $N_{mol}$  oraz jej części krzemianowej  $N_{simol}$  określono jako stosunek średniego ciężaru cząsteczkowego do wyznaczonego wcześniej średniego ciężaru atomowego  $A_{mean}$  meteorytu Jezersko (Szurgot 2019).

W niniejszej pracy średni ciężar cząsteczkowy i względna masa cząsteczkowa są traktowane jako synonimy i są wyrażane jako wielkość bezwymiarowa.

## Wyniki

W celu określenia wartości  $\langle MW \rangle$ ,  $\langle Z_{mol} \rangle$  i  $\langle MW \rangle / \langle Z_{mol} \rangle$ , wykorzystano następujące zależności opierając się na średnim składzie pierwiastkowym i tlenkowym meteorytu:

$$\langle MW \rangle = \sum wi / \sum (wi / Mi), \quad (1)$$

$$\langle Z_{mol} \rangle = \sum wi / \sum (wi / Zmi), \quad (2)$$

$$\langle MW \rangle / \langle Z_{mol} \rangle = \sum (wi / Zmi) / \sum (wi / Mi), \quad (3)$$

gdzie  $wi$  (% wagowy) to część wagi meteorytu pochodząca od  $i$ -go składnika (tlenku, siarczku i pierwiastka) tworzącego chondryt,  $Mi$  to ciężar cząsteczkowy/względna masa cząsteczkowa  $i$ -go składnika, a  $Zmi$  to liczba atomowa  $i$ -go składnika. Średni ciężar cząsteczkowy tlenków i troilitu  $Mi$ , oraz  $\langle MW \rangle$  meteorytów jest wielkością bezwymiarową, podobnie jak względna masa cząsteczkowa. Bezwymiarowe są także liczby atomowe  $Zmi$  oraz  $\langle Z_{mol} \rangle$ .

Dla pierwiastków Fe, Co i Ni, występujących w składzie chemicznym meteorytu Jezersko ich cząsteczki są jednoatomowe, wtedy  $Mi = Ai$ , oraz  $Zmi = Zi$ . Wzory (1), (2) oraz (3) są ogólne i zostały wykorzystane do obliczeń zarówno całej skały meteorytu Jezersko, jak i części krzemianowej meteorytu, dla której wprowadzono oznaczenia  $si$ .

Cząsteczkowa liczba atomowa  $Z_{mi}$  danego składnika meteorytu występującego w formie tlenku lub siarczku została obliczona ze wzoru

$$Z_{mi} = N_i \cdot Z_i, \quad (4)$$

gdzie  $Z_i$  to liczba atomowa  $i$ -tego składnika (Szurgot 2019), a  $N_i$  to liczba atomów w cząsteczce  $i$ -tego składnika.

Dla cząsteczek jednoatomowych: Fe, Ni oraz Co,  $N_i = 1$ ; dla cząsteczek dwuatomowych: FeO, MnO, MgO, CaO oraz FeS,  $N_i = 2$ ; dla cząsteczek trójatomowych: SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O oraz K<sub>2</sub>O,  $N_i = 3$ ; dla cząsteczek pięcioatomowych: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $N_i = 5$ , a dla cząsteczek siedmioatomowych: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,  $N_i = 7$ .

Tabela 1 prezentuje wartości średnich ciężarów atomowych  $A_i$  oraz średnich liczb atomowych  $Z_i$  tlenków, siarczku żelaza i pierwiastków metalicznych meteorytu Jezersko, literaturowe wartości  $M_i$  ([https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\\_dioxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_dioxide) dla SiO<sub>2</sub>) oraz wyznaczone przez autora wartości  $M_i^*$  średnich ciężarów cząsteczkowych składników meteorytu Jezersko, przy czym

$$M_i^* = N_i \cdot A_i. \quad (5)$$

Porównując kolumny siódmą i ósmą tabeli 1 można zauważyć, że jest spełniony związek

$$M_i = M_i^*, \quad (6)$$

a to oznacza, że z wyjątkiem mało znaczących różnic, istnieje dobra zgodność danych literaturowych  $M_i$  i przewidywanych przez autora wartości  $M_i^*$ .

W piątej kolumnie tabeli 1 zamieszczono wartości średnich cząsteczkowych liczb atomowych  $Z_{mi}$  składników meteorytu. W trzeciej i szóstej kolumnie tabeli 1 jest prezentowany stosunek  $M_i/A_i$  oraz stosunek  $Z_{mi}/Z_i$ , które, jak pokazują dane, określają liczbę atomów w cząsteczce danego składnika. Oznacza to słuszność związku

$$N_i = M_i / A_i = Z_{mi} / Z_i. \quad (7)$$

Uogólnienie wzoru (7) prowadzi do związku umożliwiającego określenie liczby atomów  $N_{mol}$  w uśrednionej cząsteczce meteorytu Jezersko

$$N_{mol} = \langle WM \rangle / A_{mean} = \langle Zmol \rangle / Z_{mean}. \quad (8)$$

Dla pierwiastków Fe, Co i Ni, występujących w składzie chemicznym meteorytu Jezersko ich cząsteczki są jednoatomowe i wtedy  $M_i = A_i$ , oraz  $Z_{mi} = Z_i$ . Wzory (1)–(8) są ogólne i zostały wykorzystane do obliczeń zarówno całej skały meteorytu Jezersko, jak i części krzemianowej, dla której wprowadzono oznaczenia  $si$ .

Tabela 2 prezentuje średnią zawartość tlenków i pierwiastków w chondrycie H4 Jezersko (wartości  $w_i$  (% wagowe)), wartości  $M_i$ ,  $Z_{mi}$ ,  $\langle MW \rangle$ ,  $\langle Zmol \rangle$ ,  $\langle MW \rangle / A_{mean}$ ,  $\langle MW \rangle / \langle Zmol \rangle$  oraz  $\langle Zmol \rangle / Z_{mean}$  obliczone dla materii tego chondrytu oraz jego krzemianów z wykorzystaniem równań (1)–(8). Do obliczeń dla całej skały chondrytu wykorzystano wartości  $A_{mean} = 24,68$ ,  $Z_{mean} = 12,16$ , a dla krzemianów wartości:  $A_{simean} = 54,08$ ,  $Z_{simean} = 10,78$  określone wcześniej przez Szurgota (2019).

**Tabela 1.** Wartości  $M_i$  składników meteorytu Jezersko według danych literaturowych, wartości  $A_i$  i  $Z_i$  według danych Szurgota (2019) oraz wartości stosunków:  $M_i/A_i$  oraz  $Z_{mi}/Z_i$ .

Tlenek / siarczek / pierwiastek	$A_i$	$M_i/A_i$	$Z_i$	$Z_{mi}$	$Z_{mi}/Z_i$	$M_i^*$	$M_i$
SiO <sub>2</sub>	20,028	3,0	10	30	3,0	60,084	60,080
TiO <sub>2</sub>	26,622	3,0	12,667	38	3,0	79,886	79,866
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,392	5,0	10	50	5,0	101,96	101,96
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,399	5,0	14,4	72	5,0	151,995	151,990
FeO	35,922	2,0	17	34	2,0	71,844	71,844
MnO	35,472	2,0	16,5	33	2,0	70,944	70,937
MgO	20,152	2,0	10	20	2,0	40,304	40,304
CaO	28,039	2,0	14	28	2,0	56,078	56,077
Na <sub>2</sub> O	20,66	3,0	10	30	3,0	61,98	61,980
K <sub>2</sub> O	31,397	3,0	15,833	47,499	3,0	94,19	94,20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20,278	7,0	10	70	7,0	141,946	141,945
Fe <sub>metal</sub>	55,845	1,0	26	26	1,0	55,845	55,845
Ni	58,693	1,0	28	28	1,0	58,693	58,693
Co	58,933	1,0	27	27	1,0	58,933	58,933
FeS	43,954	2,0	21	42	2,0	87,92	87,92

Tabela 2 pokazuje, że liczba atomów  $N_{mol}$  w uśrednionej cząsteczce meteorytu Jezersko wynosi 2,25 dla całej skały meteorytu oraz 2,48 dla części krzemianowej meteorytu. Średni ciężar cząsteczkowy meteorytu Jezersko wynosi 55,58, a średni ciężar cząsteczkowy krzemianów  $\langle MW_{Si} \rangle$  jest nieco mniejszy i równy 54,08. Cząsteczkowa liczba atomowa  $\langle Z_{mol} \rangle$  meteorytu Jezersko wynosi 27,21, a liczba atomowa krzemianów  $\langle Z_{Si mol} \rangle$  wynosi 26,74.

Stosunek masy cząsteczkowej meteorytu Jezersko do jego liczby atomowej  $\langle MW \rangle / \langle Z_{mol} \rangle$  wynosi dla meteorytu Jezersko 2,043, a dla części krzemianowej meteorytu 2,022.

Objętość jednej cząsteczki  $V_{mol}$  meteorytu Jezersko określono wykorzystując gęstość ziaren meteorytu  $d_{grain}$

$$V_{mol} = \langle MW_{mol} \rangle / (N_A \cdot d_{grain}), \quad (9)$$

gdzie  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  to liczba Avogadra, a  $\langle MW_{mol} \rangle$  to masa jednego mola meteorytu wyrażona w g/mol, liczbowo równa średniej masie cząsteczkowej  $\langle MW \rangle$ .

Podstawienie do wzoru (9) wartości liczbowych:  $\langle MW_{mol} \rangle = 55,58 \text{ g/mol}$  oraz  $d_{grain} = 3,67 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$  (Szurgot 2019) prowadzi do wartości objętości jednej cząsteczki meteorytu Jezersko  $V_{mol} = 2,515 \pm 0,020 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3 = 2,515 \pm 0,020 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ . Dla krzemianów meteorytu Jezersko  $d_{Si grain} = 3,29 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$  (Szurgot 2019) i  $\langle MW_{Si mol} \rangle = 54,08 \text{ g/mol}$ , co daje  $V_{Si mol} = 2,730 \pm 0,025 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ .

**Tabela 2.** Średnia zawartość tlenków i pierwiastków w chondrycie H4 Jezersko, wartości  $M_i$ ,  $Z_{mi}$ ,  $\langle MW \rangle$ ,  $\langle Z_{mol} \rangle$ ,  $\langle MW \rangle / A_{mean}$ ,  $\langle MW \rangle / \langle Z_{mol} \rangle$  oraz  $\langle Z_{mol} \rangle / Z_{mean}$  tego chondrytu.

Tlenek / pierwiastek / siarczek	$Z_{mi}$	$M_i$	Jezersko	Krzemiany
			$w_i$ (% wag.)	$w_i$ (% wag.)
SiO <sub>2</sub>	30	60,080	36,41	36,41
TiO <sub>2</sub>	38	79,866	0,099	0,099
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	101,96	2,06	2,06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	72	151,990	0,484	–
FeO	34	71,844	11,82	11,82
MnO	33	70,937	0,306	0,306
MgO	20	40,304	22,92	22,92
CaO	28	56,077	1,665	1,665
Na <sub>2</sub> O	30	61,980	0,795	0,795
K <sub>2</sub> O	47,499	94,20	0,12	0,12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	70	141,945	0,24	–
Fe <sub>metal</sub>	26	55,845	13,31	–
Ni	28	58,693	1,5	–
Co	27	58,933	0,0727	–
FeS	42	87,92	4,09	–
$\Sigma w_i$			95,89	76,19
$\Sigma(w_i/M_i)$			1,725299017	1,408775666
$\Sigma(w_i/Z_{mi})$			3,524601146	2,848882302
$\langle MW \rangle$			55,58	54,08
$\langle Z_{mol} \rangle$			27,21	26,74
$N_{mol} = \langle MW \rangle / A_{mean}$			2,25	2,48
$\langle Z_{mol} \rangle / Z_{mean}$			2,24	2,48
$\langle MW \rangle / \langle Z_{mol} \rangle$			2,043	2,022

$\Sigma$  = suma.

Znajomość objętości jednej cząsteczki  $V_{mol}$  meteorytu pozwala określić średnicę tej cząsteczki  $D_{mol}$  i promień cząsteczki  $R_{mol}$ . Założenie kulistego kształtu cząsteczek meteorytu Jezersko i założenie pełnego wypełnienia przestrzeni przez kuliste atomy i kuliste cząsteczki meteorytu prowadzi do wyrażenia na średnicę cząsteczki

$$D_{mol} = (V_{mol} \cdot 6 / \pi)^{1/3}, \quad (10)$$

ponieważ objętość kuli o średnicy  $D$  wynosi  $V_{kuli} = (\pi/6) \cdot D^3$ .

Zgodnie ze wzorem (10) średnica cząsteczki meteorytu Jezersko wynosi  $D_{mol} = 363 \pm 1$  pm, a promień cząsteczki  $R_{mol} = 181 \pm 1$  pm. Średnica cząsteczki krzemianów meteorytu Jezersko wynosi  $D_{simol} = 374 \pm 1$  pm, a promień cząsteczki krzemianów  $R_{simol} = 187 \pm 1$  pm.

W celu porównania objętości  $V_{mol}$  i średnicy cząsteczki  $D_{mol}$  meteorytu Jezersko z objętością  $V_{atom}$  i średnicą atomu  $D_{atom}$  tego meteorytu wyznaczono także i te wielkości fizyczne wykorzystując następujące wzory

$$V_{atom} = A_{mean} * / (N_A \cdot d_{grain}), \quad (11)$$

$$D_{atom} = 2 \cdot R_{atom} = (V_{atom} \cdot 6 / \pi)^{1/3} = ((A_{mean} * / (N_A \cdot d_{grain})) \cdot 6 / \pi)^{1/3}, \quad (12)$$

gdzie  $A_{mean} *$  to gramoatom meteorytu, liczbowo równy średniemu ciężarowi atomowemu, ale wyrażonemu w g/mol.

Podstawienie do wzoru (11) wartości liczbowych:  $A_{mean} * = 24,68$  g/mol oraz  $d_{grain} = 3,67 \pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup> (Szurgot 2019) prowadzi do wartości objętości jednego atomu meteorytu Jezersko  $V_{atom} = 1,117 \pm 0,009 \cdot 10^{-29}$  m<sup>3</sup>. Dla krzemianów meteorytu Jezersko  $d_{sigrain} = 3,29 \pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup> (Szurgot 2019) i  $A_{simean} * = 21,77$  g/mol, co daje  $V_{siatom} = 1,099 \pm 0,010 \cdot 10^{-29}$  m<sup>3</sup>. Podstawienie wartości  $V_{atom}$  oraz  $V_{siatom}$  do wzoru (12) przewiduje wartość średnicy atomu meteorytu Jezersko  $D_{atom} = 277 \pm 1$  pm i wartość średnicy atomu krzemianów meteorytu Jezersko  $D_{siatom} = 276 \pm 3$  pm. Oznacza to promień średniego atomu meteorytu  $R_{atom} = 138 \pm 1$  pm i promień średniego atomu krzemianów meteorytu Jezersko  $R_{simol} = 138 \pm 2$  pm.

Stosunek  $V_{mol}$  do  $V_{atom}$  jest dany wzorem

$$V_{mol} / V_{atom} = \langle MW_{mol} \rangle / A_{mean} * = \langle MW \rangle / A_{mean} = N_{mol}, \quad (13)$$

a stosunek  $D_{mol} / D_{atom}$  i stosunek  $R_{mol} / R_{atom}$  wzorem

$$D_{mol} / D_{atom} = R_{mol} / R_{atom} = (V_{mol} / N_{atom})^{1/3} = (A_{mean} / N_{mol})^{1/3}. \quad (14)$$

Dane te pokazują, że liczba atomów w cząsteczce  $N_{mol}$  określa stosunek  $V_{mol} / V_{atom}$  oraz stosunek  $D_{mol} / D_{atom}$  i wzajemnie, stosunki te określają liczbę  $N_{mol}$ . Wartość stosunku objętości  $V_{mol} / V_{atom}$  wynosi:  $2,252 \approx 2,25$  dla całej skały meteorytu Jezersko oraz  $2,484 \approx 2,48$  dla części krzemianowej, a stosunku średnic  $D_{mol} / D_{atom}$  i promieni  $R_{mol} / R_{atom}$  wynosi:  $1,31$  dla całej skały meteorytu Jezersko oraz  $1,35$  dla części krzemianowej meteorytu.

Jak wyżej wspomniano liczba atomów w cząsteczce  $N_{mol}$  może być wyrażona przez średnice cząsteczek i atomów  $D_{mol}$  i  $D_{atom}$  oraz przez promienie cząsteczek i atomów  $R_{mol}$  i  $R_{atom}$ . Ponieważ przy kulistym kształcie cząsteczek i atomów objętość jest proporcjonalna do trzeciej potęgi średnic i trzeciej potęgi promieni to

$$N_{mol} = V_{mol} / V_{atom} = (D_{mol} / D_{atom})^3 = (R_{mol} / R_{atom})^3. \quad (15)$$

Wartości  $A_{mean}$ ,  $\langle MW \rangle$ ,  $Z_{mean}$ ,  $\langle Z_{mol} \rangle$ ,  $V_{mol}$ ,  $V_{atom}$ ,  $V_{mol}$  oraz  $R_{atom}$ ,  $R_{mol}$  i  $N_{mol}$  dla całej skały meteorytu Jezersko i jego części krzemianowej zebrano w tabeli 3. Prezentowane wartości dotyczą głównie meteorytu w jego obecnym stopniu zwietrzenia W2, ale pokazano również wartości  $V_{atom}(W0)$  oraz  $R_{atom}(W0)$  wyznaczone dla meteorytu niezwiertzałego.

Prezentowane wyżej obliczenia dotyczą głównie aktualnego stopnia zwietrzenia W2 meteorytu Jezersko. W swojej uprzedniej pracy autor oszacował dla chondrytu Jezersko wartości  $A_{mean}(W0)$  oraz  $d_{grain}(W0)$  dla jego stanu niezwiertzałego, tj. dla stopnia zwietrzenia W0. Wynoszą one:  $A_{mean}(W0) = 25,13$  oraz

**Tabela 3.** Wartości  $A_{mean}$ ,  $\langle MW \rangle$ ,  $Z_{mean}$ ,  $\langle Z_{mol} \rangle$ ,  $V_{atom}$ ,  $V_{mol}$  oraz  $R_{atom}$ ,  $R_{mol}$  i  $N_{mol}$  dla całej skały meteorytu Jezersko i jego części krzemianowej. Wartości  $A_{mean}$  oraz  $Z_{mean}$  określono we wcześniejszej pracy autora (Szurgot 2019).

Składnik meteorytu	$A_{mean}$	$\langle MW \rangle$	$Z_{mean}$	$\langle Z_{mol} \rangle$	$V_{atom}$ ( $10^{-29}$ $m^3$ )	$V_{mol}$ ( $10^{-29}$ $m^3$ )	$R_{atom}$ (pm)	$R_{mol}$ (pm)	$N_{mol}$
Cała skała (W2)	24,68	55,58	12,16	27,21	1,117	2,515	138,5	181,5	2,25
Cała skała (W0)	25,13				1,119		139		
Krzemiany (W2)	21,77	54,08	10,78	26,74	1,099	2,730	138,0	187	2,48

$d_{grain}(W0) = 3,73 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  (Szurgot 2019). Znajomość tych wielkości umożliwia określenie wartości objętości atomu niezwiertzałego meteorytu Jezersko  $V_{atom}(W0)$  oraz promienia tego atomu  $R_{atom}(W0)$ . Podstawienie do wzoru (11) wartości liczbowych:  $A_{mean}^* = 25,13 \text{ g/mol}$  oraz  $d_{grain} = 3,73 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  (Szurgot 2019) prowadzi do wartości objętości jednego atomu meteorytu Jezersko  $V_{atom}(W0) = 1,119 \pm 0,006 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ , a podstawienie wartości  $V_{atom}(W0)$  do wzoru (12) przewiduje wartość promienia atomu meteorytu Jezersko  $R_{atom}(W0) = 139 \pm 1 \text{ pm}$ . Wyniki pokazują, że pomimo zauważalnego wzrostu wartości  $A_{mean}$  oraz  $d_{grain}$  dla niezwiertzałego meteorytu zarówno objętość jak i promień molekuły meteorytu Jezersko pozostają praktycznie takie same.

Liczba atomów w cząsteczce meteorytu  $N_{mol}$  jest określona przez stosunek  $\langle MW \rangle / A_{mean}$  (równanie (13)), także przez stosunek objętości  $V_{mol} / V_{atom}$  i wynosi 2,25 dla całej skały meteorytu Jezersko oraz 2,48 dla krzemianów. Oznacza to, że liczba atomów w cząsteczce  $N_{mol}$  krzemianów jest o około 10% większa niż liczba atomów w cząsteczce całej skały meteorytu Jezersko.

Wyniki przedstawione w tabeli 3 pokazują, że krzemiany meteorytu Jezersko wykazują porównywalne wartości  $R_{atom}$  oraz  $R_{mol}$  w stosunku do całej skały, ale wykazują mniejsze wartości  $A_{mean}$ ,  $Z_{mean}$ ,  $\langle Z_{mol} \rangle$  oraz  $V_{atom}$  niż cała skała meteorytu.

Analiza danych literaturowych dotyczących pierwiastków i związków chemicznych uwidacznia ich pewne podobieństwo do meteorytu Jezersko, wynikające ze zbliżonych wartości ciężarów atomowych i liczb atomowych meteorytu Jezersko i niektórych pierwiastków i minerałów (tab. 4).

Wartość  $d_{grain}$  dla magnezu (<https://pl.wikipedia.org/wiki/Magnez>). Wartości  $d_{grain}$  wollastonitu (<https://pl.wikipedia.org/wiki/Wollastonit>), a wartości  $A_{mean}$ ,  $Z_{mean}$  oraz  $R_{atom}^*$  zostały wyznaczone przez autora.

Magnez ( $Mg$ ,  $A = 24,305$ ,  $Z = 12$ ,  $d_{grain} = 1,738 \text{ g/cm}^3$ ) jest jednym z pierwiastków o zbliżonych wartościach  $A_{mean}$ ,  $Z_{mean}$  oraz  $R_{atom}$  do skały meteorytu Jezersko. Wykorzystanie równania (12) przewiduje dla promienia atomu  $Mg$  wartość 177 pm, wartość dość wysoką, ale względnie bliską średniemu promieniowi atomu  $Mg$  równemu 160 pm (Rahm i in. 2016). Należy dodać, że określenie promienia atomowego nie jest łatwe i zakres literaturowy wartości  $R_{atom}$  dla magnezu jest dość szeroki: 130–240 pm (tab. 4). Promień van der Waalsa atomu magnezu



**Tabela 4.** Wartości  $A_{mean}$ ,  $Z_{mean}$ , oraz  $R_{atom}$  dla całej skały meteorytu Jezersko i wartości  $A$ ,  $Z$ , oraz  $R_{atom}$  pierwiastka magnezu i minerału wollastonitu. Wartości  $A_{mean}$  oraz  $Z_{mean}$  meteorytu Jezersko określono we wcześniejszej pracy autora (Szurgot 2019), a dla magnezu to wartości literaturowe oraz wartość  $R_{atom}^*$  wyznaczona z równania (12). Dla wollastonitu promień atomowy wyznaczono z równania (12).

Meteoryt / pierwiastek / minerał	$A_{mean}/A$	$Z_{mean}/Z$	$d_{grain}$ (g/cm) <sup>3</sup>	$R_{atom}^*$ (równ. 12)	$R_{atom}$ (literatura)
Jezersko (W2)	24,68	12,16	3,67	138 pm	
Magnez	24,305	12	1,738	177 pm	145 pm*, 160 pm <sup>#</sup> , 130 pm**, 173 pm**, 240 pm <sup>##</sup>
Wollastonit	23,234	11,60	2,86–3,09	140–148 pm	

\* Wartość obliczonego promienia atomowego Mg (<https://pl.wikipedia.org/wiki/Magnez>).

\*\* Promień walencyjny Mg: 130 pm, promień van der Waalsa 173 pm (<https://pl.wikipedia.org/wiki/Magnez>).

# Wartość średnia promienia atomowego magnezu (Emsley 1998), ## Wartość  $R_{atom}$  dla Mg wyznaczona przez Rahma i in. (2016).

(173 pm) jest prawie równy promieniowi atomu magnezu (177 pm) wyznaczone-mu z równania (12).

Wollastonit ( $\text{CaSiO}_3$ ,  $A_{mean} = 23,234$ ,  $Z_{mean} = 11,60$ , gęstość = 2,86–3,09 g/cm<sup>3</sup>) jest jednym z minerałów o zbliżonych do meteorytu Jezersko wartościach  $A_{mean}$ ,  $Z_{mean}$  oraz  $R_{atom}$ . Wykorzystanie równania (12) przewiduje dla średniego promienia atomu wollastonitu wartość z zakresu 140–148 pm.

Promień średniego atomu meteorytu Jezersko (W2) ( $A_{mean} = 24,68$ ,  $Z_{mean} = 12,16$ ,  $d_{grain} = 3,67$  g/cm<sup>3</sup>) wynosi według równania (12), dla średniego stanu zwietrzenia W2: 138±1 pm. Prezentowane dane ukazują porównywalne wartości promieni atomowych chondrytu Jezersko, magnezu oraz wollastonitu.

## Wnioski

Niniejsza praca prezentuje wyniki badań średniego ciężaru cząsteczkowego  $\langle MW \rangle$ , średniej liczby atomowej cząsteczki  $\langle Z_{mol} \rangle$ , średniej objętości atomu i objętości cząsteczki  $V_{atom}$ ,  $V_{mol}$ , średniego promienia atomu i cząsteczki  $R_{atom}$ ,  $R_{mol}$  oraz liczby atomów w cząsteczce  $N_{mol}$  chondrytu zwyczajnego Jezersko (H4, S2(3), W2).

1. W oparciu o dane literaturowe o składzie chemicznym meteorytu i związku wyprowadzone przez autora otrzymano dla całej skały chondrytu Jezersko następujące wartości  $\langle MW \rangle$ ,  $V_{mol}$ ,  $V_{atom}$ ,  $R_{mol}$ ,  $R_{atom}$  i  $N_{mol}$ :

$$\langle MW \rangle = 55,58, \quad \langle Z_{mol} \rangle = 27,21, \quad V_{mol} = 2,515 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3, \quad V_{atom} = 1,117 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3, \quad R_{mol} = 181,5 \text{ pm}, \quad R_{atom} = 131,5 \text{ pm}, \quad N_{mol} = 2,25.$$

2. Pokazano, że liczba atomów w cząsteczce meteorytu  $N_{mol}$  jest określona przez stosunek  $\langle MW \rangle / A_{mean}$  (równanie (13)), a także przez stosunek objętości  $V_{mol} / V_{atom}$  i stosunek promieni  $R_{mol} / R_{atom}$  (równanie (15)).

3. Pokazano, że średnia objętość atomu  $V_{atom}$  jest określona przez stosunek  $A_{mean}/d_{grain}$  (równanie (11)), a średnia objętość cząsteczki  $V_{mol}$  przez stosunek  $\langle MW_{mol} \rangle / d_{grain}$  oraz liczbę Avogadro  $N_A$  (równanie (9)).
4. Promień atomowy  $R_{atom}$  oraz promień cząsteczki  $R_{mol}$  meteorytu Jezersko wyznaczone przy założeniu kulistego kształtu atomu i cząsteczki (równanie (12)) są porównywalne z promieniem atomowym pierwiastka magnezu i średnim promieniem atomowym minerału wollastonitu.
5. Średni stopień zwietrzenia ( $W_2$ ) nie zmienia zauważalnie objętości i promienia molekuly meteorytu Jezersko.

Nowe zależności: równania (9), (11), (12), (13) i (15), wprowadzone przez autora dla ilościowego opisu i analizy atomu i cząsteczki chondrytu Jezersko i innych meteorytów są zdaniem autora niezwykle użytecznym narzędziem, które może być użyte do charakterystyki meteorytów i skał ziemskich.

### Podziękowania

Serdecznie dziękuję żonie mgr farm. Jadwidze Szurgot za jej wsparcie, okazaną pomoc i konsultacje podczas badań. Dr inż. Katarzynie Łuszczek z Politechniki Wrocławskiej dziękuję za cenne sugestie dotyczące prezentacji wyników badań.

### Literatura

- Anderson D.L., 1989, *Theory of the Earth*, Blackwell Scientific Publications, London.
- Anderson D.L., Kovach R.L., 1967, *The composition of the terrestrial planets*, Earth and Planetary Science Letters, 3, s. 19–24.
- Anderson D.L., Jordan T., 1970, *The composition of lower mantle*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 3, s. 23–35.
- Bartoschewitz R., Appel P., Barrat J.-A., Bischoff A., Caffee M.W., Franchi, I.A. Gabelica Z., Greenwood R.C., Harir M., Harries D., Hochleitner R., Hopp J., Laubenstein M., Mader B., Marques R., Morlok A., Nolze G., Prudencio M.I., Rochette P., Ruf A., Schmitt-Koppelin P., Seemann E., Szurgot M., Tagle R., Wach R.A., Welten K.C., Weyrauch M., Wimmer K. (The Braunschweig Meteorite Consortium), 2017, *The Braunschweig meteorite – a recent L6 chondrite fall in Germany*, Chemie der Erde/Geochemistry, 77, s. 207–224.
- Beech M., Coulson I.M., Nie W., McCausland P., 2009, *The thermal and physical characteristics of the Gao-Guenie (H5) meteorite*, Planetary and Space Science, 57, s. 764–770.
- Birch F., 1961, *Composition of the Earth's Mantle*, Geophysical Journal International, 4, s. 295–311.
- Britt D.T., Consolmagno G.J., 2003, *Stony meteorite porosities and densities: a review of the data through 2001*, Meteoritics & Planetary Science, 38, s. 1161–118.
- Consolmagno G.J., Macke R.J., Rochette P., Britt D.T., Gattacceca J., 2006, *Density, magnetic susceptibility, and the characterization of ordinary chondrite falls and showers*, Meteoritics & Planetary Science, 41, s. 331–342.
- Consolmagno G.J., Britt D.T., Macke R.J., 2008, *The significance of meteorite density and porosity*, Chemie der Erde – Geochemistry, 68, s. 1–29.
- Emsley J., 1998, *The Elements*, 3<sup>rd</sup> Ed., Clarendon Press, Oxford.
- Flynn G.J., Consolmagno G.J., Britt D.T., Brown P., Macke R.J., 2018, *Physical properties of the stone meteorites: Implications for the properties of their parent bodies*, Chemie der Erde, 78, s. 269–298.

- Kiefer W.S., Macke R.J., Britt D.T., Irving A.J., Consolmagno G.J., 2012, *The density and porosity of lunar rocks*, Geophysical Research Letters, 39, L07201.
- Kohout T., Kletetschka G., Elbre T., Adachi T., Mikula V., Pesonen L.J., Schnabl P., Slechta S., 2008, *Physical properties of meteorites – applications in space missions to asteroids*, Meteoritics & Planetary Science, 43, s. 1009–1020.
- Łuszczek K., Wach R.A., 2014. *NWA 6255 meteorite – Thermophysical properties of interior and the crust*, Meteorites, 3, s. 33–44.
- Macke R.J., 2010, *Survey of meteorite physical properties: density, porosity and magnetic susceptibility*, Ph.D. Thesis, University of Central Florida, Orlando.
- Macke R.J., Consolmagno G.J., Britt D.T., Hutson M.L., 2010, *Enstatite chondrite density, magnetic susceptibility, and porosity*, Meteoritics & Planetary Science, 45, s. 1513–1526.
- Macke R.J., Britt D.T., Consolmagno G.J., 2011, *Density, porosity, and magnetic susceptibility of achondritic meteorites*, Meteoritics & Planetary Science, 46, s. 311–326.
- Macke R.J., Opeil C. P., Consolmagno G.J., 2019, *Heat capacities of ordinary chondrite falls below 300 K*, Meteoritics & Planetary Science, 54, s. 2729–2743.
- Maj S., 1998, *Phonon thermal conductivity of geomaterials: Relationship to the density and mean atomic weight*, Acta Geophysica Polonica, 46, s. 415–425.
- Miler M., Ambrozic B., Mitric B., Gosar M., Sturm S., Dolenc M., Jersek M., 2014, *Mineral and chemical composition of the Jezersko meteorite – a new chondrite from Slovenia*, Meteoritics & Planetary Science, 49, s. 1875–1887.
- Opeil C.P., Consolmagno G.J., Safarik D.J., Britt D.T., 2012, *Stony meteorite thermal properties and their relationship to meteorite chemical and physical states*, Meteoritics & Planetary Science, 47, s. 319–329.
- Ostrowski D., Bryson K., 2019, *The physical properties of meteorites*, Planetary and Space Science. doi:10.1016/j.pss.2018.11.003.
- Petrovic J.J., 2001, *Review mechanical properties of meteorites and their constituents*, Journal of Materials Science, 36, s. 1579–1583.
- Przylibski T.A., 2016, *Chondryt Soltmany*, Acta Soc. Meteor. Polon., 7, s. 93–122.
- Rahm M., Hoffmann R., Ashcroft N.W., 2016, *Atomic and Ionic Radii of Elements 1–96*, Chemistry A European Journal, 22, s. 14625–14632.
- Ringwood A.E., 1966, *Chemical evolution of the terrestrial planets*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 30, s. 41–104.
- Rochette P., Sagnotti L., Bourot-Denise M., Consolmagno G.J., Folco L., Gattacceca J., Osete L.M., Pesonen L., 2003, *Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 38, s. 251–268.
- Rochette P., Gattacceca J., Bonal L., Bourot-Denise M., Chevrier V., Clerc J.P., Consolmagno G.J., Folco L., Gounnelle M., Kohout T., Pesonen L., Quirico E., Sagnotti L., Skripnik A., 2008, *Magnetic classification of stony meteorites: 2. Non-ordinary chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 43, s. 959–980.
- Rochette P., Gattacceca J., Lewandowski M., 2012, *Magnetic classification of meteorites and application to the Soltmany fall*, Meteorites, 2, s. 67–71.
- Soini T.-J., Kukkonen I.T., Kohout T., Luttinen A., 2020, *Thermal and porosity properties of meteorites: A compilation of published data and new measurements*, Meteoritics & Planetary Science, 55, s. 1–24. doi:10.1111/maps.13441.
- 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 Soc. Meteor. Polon., 6, s. 107–128.
- Szurgot M., 2015d, *Mean atomic weight of Pultusk meteorite and H chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 50 (S1), #5013.pdf
- Szurgot M., 2017a, *Mean atomic weight of Earth and enstatite chondrites*, Lunar and Planetary Science Conference 48<sup>th</sup>, Abstract #1130.
- Szurgot M., 2017b, *Uncompressed density of the Moon, lunar mantle and core*, LPI Contrib. No. 2021, Workshop on Modern Analytical Methods Applied to Earth, Planetary, and Material Sciences II 2017, Abstract #6007
- Szurgot M., Wach R.A., Przylibski T. 2012. *Thermophysical properties of Soltmany meteorite*, Meteorites, 2, s. 53–65.
- Szurgot M., 2019, *Średni ciężar atomowy i gęstość ziaren chondrytu Jezersko (H4)*, Acta Soc. Meteor. Polon., 10, s. 140–159.
- Szurgot M.A., 2020, *Ciepło właściwe i ciepło atomowe chondrytu Jezersko*, Przegląd Geologiczny, 68, s. 54–59.
- Wilkison S.L., Robinson M.S., 2000, *Bulk density of ordinary chondrite meteorites and Implications for asteroidal internal structure*. Meteoritics & Planetary Science, 35, s. 1203–1213.

### Źródła internetowe

- <https://pl.wikipedia.org/wiki/Magnez>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Molar\\_mass](https://en.wikipedia.org/wiki/Molar_mass)  
<http://facstaff.cbu.edu/rprice/lectures/compos.html>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\\_dioxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_dioxide)  
<https://pl.wikipedia.org/wiki/Wollastonit>