



Ciepło właściwe i ciepło atomowe chondrytu Jezersko

Marian A. Szurgot¹**Specific heat and atomic heat of the Jezersko chondrite.** *Prz. Geol.*, 68: 54–59; doi: 10.7306/2020.1

Abstract. Specific heat capacity of the Jezersko chondrite (H4, S2/3, W2) was predicted by a relationship between bulk density and heat capacity of meteorites $C_p(d_{bulk})$. It was calculated that $C_p(d_{bulk})$ is equal to 703 ± 15 J/(kgK) at 300 K, and 529 ± 15 J/(kgK) at 200 K. Its volumetric heat capacity is equal to 1.8 ± 0.1 MJ/(m³K) at 200 K, and 2.3 ± 0.1 MJ/(m³K) at 300 K, which is close to the room temperature value characteristic of stony meteorites (2.5 MJ/(m³K)). The atomic heat of the Jezersko meteorite is 13.1 ± 0.4 J/(molK) at 200 K, and 17.4 ± 0.4 J/(molK) at 300 K. It was shown that mean atomic weight enables predicting room temperature values of specific heat capacity of ordinary chondrites, and the common mean atomic heat of ordinary chondrites is equal to 17.5 ± 0.6 J/(molK) at 300 K.

Keywords: Jezersko chondrite, ordinary chondrites, specific heat, atomic heat

Badanie skał pozaziemskich (meteorytów), zwłaszcza ich składu chemicznego i mineralnego oraz właściwości fizycznych, prowadzi do poznania ich ciał macierzystych, planetoid i planet, potencjalnych źródeł cennych i rzadkich surowców, w celu poznania i pozyskania których są organizowane załogowe i bezzałogowe misje kosmiczne. Oprócz aspektów naukowych, czysto poznawczych, ważnym priorytetem misji są cele komercyjne, nastawione na intensywną eksploatację surowców pozaziemskich. Rozwój górnictwa pozaziemskiego wymaga wieloletnich i wielokierunkowych przygotowań, także zebrania jak największej ilości informacji naukowych o materii skalnej, której odłamki od miliardów lat w sposób naturalny są dostarczane na Ziemię, kolekcjonowane i badane lub po które organizujemy kosztowne wyprawy kosmiczne.

Obecnie są realizowane misje:

- ❑ OSIRIS REx do planetoidy Bennu (<https://www.asteroidmission.org/>; <https://en.wikipedia.org/wiki/OSIRIS-REx>);
- ❑ Hayabusa-2 do planetoidy Ryugu (<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/>).

Niektóre misje ukierunkowane na badania planetoid zostały już zrealizowane, a były to:

- ❑ NEAR Shoemaker do planetoidy Eros (https://en.wikipedia.org/wiki/NEAR_Shoemaker);
- ❑ Hayabusa do planetoidy Itokawa (<https://en.wikipedia.org/wiki/Hayabusa>).

Pięćdziesiąt lat temu człowiek wylądował na Księżycu. Do realizacji dalszych ambitnych planów kosmicznych ludzkości jest wymagane wykorzystanie pozaziemskich zasobów surowcowych.

Uderzenia w naszą planetę dużych meteorytów – poruszających się z prędkością kosmiczną – prowadzą do groźnych kataklizmów i masowych wymierań organizmów żywych. Takie groźne zdarzenia niszczyły życie na Ziemi i nadal stanowią duże zagrożenie dla cywilizacji ludzkiej. Poważnym zagrożeniem są możliwe w niedalekiej przy-

szłości kolizje Ziemi z asteroidami: Bennu, Apophis, QV89 oraz QQ23, oraz innymi dużymi obiektami kosmicznymi, znajdującymi się na orbitach kolizyjnych z Ziemią (<http://neo.ssa.esa.int/risk-page>). Skutki niezwykle silnych bombardowań Ziemi materią pozaziemską są zapisane w skałach naszej planety, a monitorowanie obiektów NEO's (*Near Earth Objects*) i przygotowywanie środków obrony planety są poważnym wyzwaniem dla współczesnej nauki i techniki. Instytucją NASA, monitorującą takie groźne obiekty, jest *Center for NEO Studies* (CNEOS), a instytucją Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) jest *Near-Earth Object Coordination Centre* (NEOCC). Zaangażowanie nauk podstawowych w górnictwo ziemskie i pozaziemskie, obejmujące prace eksperymentalne i teoretyczne, jest wskazane i potrzebne. Badania właściwości termofizycznych, w szczególności badania ciepła właściwego skał i minerałów ziemskich, są prowadzone od dawna, a zbiorcze dane są publikowane w renomowanych czasopismach i encyklopediach (Horai, 1971; Robie i in., 1978; Čermák, Rybach, 1982; Waples, Waples, 2004). Kompleksowe badania skał pozaziemskich (meteorytów) są prowadzone w wielu krajach, a te realizowane w Polsce są ukierunkowane głównie na poznanie materii planetoid. Ważną częścią tych badań są prace dotyczące pozaziemskich źródeł cennych surowców (Łuszczek, Przylibski, 2019).

Właściwości cieplne planetoid, planet i komet są integralną częścią misji kosmicznych. W Polsce są projektowane i konstruowane satelity oraz urządzenia i przyrządy pomiarowe przeznaczone do eksploracji kosmosu (<https://satrevolution.com/mars/>). Należy do nich polski instrument badawczy MUPUS próbnika *Philae* sondy *Rosetta* Europejskiej Agencji Kosmicznej, który skonstruowano do badań komety 67P/Czuriumow-Gierasimienko (<https://www.esa.int/>). Innym przykładem kosmicznego urządzenia badawczego, wykorzystywanego obecnie na Marsie, jest polsko-niemieckiej produkcji penetrator geologiczny Kret HP3 sondy *InSight*. Sonda HP3 to próbnik do

¹ Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki Politechniki Łódzkiej, al. Politechniki 11, 90-924 Łódź; mszurgot@p.lodz.pl

pomiaru temperatury i przewodności cieplnej warstwy przy powierzchniowej i strumienia ciepła z wnętrza Czerwonej Planety (https://www.nasa.gov/mission_pages/insight/overview/index.html).

Badania właściwości fizycznych i termofizycznych meteorytów oraz ich ciał macierzystych są prowadzone od dawna (Alexeyeva, 1958; Wood, 1963), a problematyka ta nadal cieszy się dużym zainteresowaniem (Matsui, Osako 1979; Yomogida, Matsui, 1983; Ghosh, McSween, 1999; Wilkison, Robinson, 2000; Beech i in., 2009; Macke, 2010; Szurgot, 2011, 2019; Henke i in., 2012; Opeil i in., 2012; Szurgot i in., 2012; Consolmagno i in., 2013; Łuszczek, Wach, 2014; Przylibski, 2016; Flynn i in., 2018; Macke i in., 2019; Ostrowski, Bryson, 2019).

CEL PRACY

W 1992 r. w paśmie górskim Karawanki w Słowenii znaleziono meteoryt Jezersko i sklasyfikowano jako średnio zszokowany S2(3) chondryt zwyczajny H4 o umiarkowanym stopniu zwietrzenia W2 (Miler i in., 2014). Dotychczasowe badania właściwości fizycznych meteorytu Jezersko objęły gęstość objętościową (Miler i in., 2014), gęstość ziaren, średni ciężar atomowy, średnią liczbę porządkową i stosunek atomowy *Fe/Si* (Szurgot, 2019). Celem prezentowanych badań było określenie ciepła właściwego, objętościowej pojemności cieplnej oraz ciepła atomowego chondrytu Jezersko.

METODY BADAŃ

Praca ma profil teoretyczny. Przewidywania oparto na znanych zależnościach eksperymentalnych, odkrytych w ostatnich latach odnośnie materii meteorytów i skał ziemskich, oraz danych eksperymentalnych dotyczących meteorytu Jezersko i chondrytów zwyczajnych. Ciepło właściwe wyznaczono na podstawie zależności pomiędzy ciepłem właściwym i gęstością objętościową (Szurgot, 2011; Waples, Waples, 2004), a także zależności pomiędzy ciepłem właściwym i średnim ciężarem atomowym. Ciepło atomowe i objętościowe ciepło właściwe określono zgodnie z definicjami tych wielkości fizycznych.

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Ciepło właściwe (C_p) reprezentuje energię cieplną wymaganą do zmiany temperatury jednostki masy substancji o jednostkę temperatury przy stałym ciśnieniu: $C_p = M^{-1} \times \Delta Q / \Delta T$. Ciepło właściwe meteorytu Jezersko w temperaturze pokojowej (300 K) określono na podstawie odkrytej w 2011 r. zależności $C_p(d_{bulk})$ ciepła właściwego meteorytów od ich gęstości objętościowej (d_{bulk}):

$$C_p = a + \frac{b}{d_{bulk}} \quad [1]$$

gdzie:

C_p – ciepło właściwe [J/(kgK)],

stała $a = 306$ J/(kgK),

stała $b = 1310$ kJ/(m³K),

d_{bulk} – gęstość objętościowa (Szurgot, 2011).

Po podstawieniu do wzoru [1] wartości liczbowej gęstości objętościowej $d_{bulk} = 3300 \pm 100$ kg/m³, zmierzonej przez Milera i współpracowników (2014), w temperaturze 300 K

otrzymujemy dla meteorytu Jezersko $C_p(d_{bulk}) = 703 \pm 15$ J/(kgK). Błąd względny tego określenia przyjęto jako 2%.

Analiza danych literaturowych (Macke i in., 2016), prezentowana w dalszej części pracy, oraz najnowsze dane (Macke i in., 2019) wskazują, że ciepło właściwe chondrytów zwyczajnych w temperaturze 200 K jest ok. 1,33 razy mniejsze niż w temperaturze pokojowej. Oznacza to, że ciepło właściwe meteorytu Jezersko w temperaturze 200 K wynosi w przybliżeniu 529 ± 15 J/(kgK).

Znajomość średniego ciężaru atomowego i średniego ciepła atomowego umożliwia określenie ciepła właściwego minerałów, skał ziemskich i meteorytów w różnych temperaturach, zwłaszcza w temperaturze pokojowej (300 K). Ciepło atomowe (C_{atom}) reprezentuje energię wymaganą do zmiany temperatury jednego mola substancji o jednostkę i jest definiowane jako:

$$C_{atom} = C_p \times A_{mean} \quad [2]$$

gdzie:

C_{atom} – ciepło atomowe [J/(molK)],

C_p – ciepło właściwe [J/(gK)],

A_{mean} – średni ciężar atomowy [g/mol].

Średni ciężar atomowy, podobnie jak względna masa atomowa, w większości publikowanych prac jest wyrażony jako wielkość bezwymiarowa, jednak w tej pracy jest wymagane stosowanie g/mol jako jednostki A_{mean} .

W przypadku chondrytu Jezersko, którego średni ciężar atomowy $A_{mean} = 24,68$ g/mol (Szurgot, 2019), a ciepło właściwe wynikające z zależności $C_p(d_{bulk})$ wynosi $C_p(300\text{ K}) = 703 \pm 15$ J/(kgK), $C_p(200\text{ K}) = 529 \pm 15$ J/(kgK), to średnie ciepło atomowe (C_{atom}) wynosi: $C_{atom}(300\text{ K}) = 17,35 \pm 0,37$ J/molK $\approx 17,4 \pm 0,4$ J/molK oraz $C_{atom}(200\text{ K}) = 13,06 \pm 0,37$ J/(molK) $\approx 13,1 \pm 0,4$ J/(molK). Średnie ciepło atomowe chondrytu Jezersko w temperaturze 200 K jest bliskie wartości $C_{atom}(200\text{ K})$ chondrytu Pułtusk H5 (13,4 J/(molK); tab. 1).

Obliczenia i wyniki analizy ciepła atomowego wybranych chondrytów zwyczajnych (OC) pokazują, że w temperaturze pokojowej wartości C_{atom} chondrytów zwyczajnych mieszczą się w przedziale: 16,0–18,4 J/(molK), chondrytów H w przedziale 17,1–18,4 J/(molK), a uśrednione ciepło atomowe chondrytów zwyczajnych wynosi $C_{atom,OC}(300\text{ K}) = (17,5 \pm 0,6)$ J/(molK) (tab. 1). Względnie wąski zakres wartości $C_{atom}(300\text{ K})$ uzasadnia przyjęcie wspólnej wartości średniej $C_{atom}(300\text{ K})$ dla całej grupy chondrytów zwyczajnych. Średnie ciepło atomowe chondrytu Jezersko w temperaturze pokojowej jest bliskie uśrednionej wartości ciepła atomowego chondrytów zwyczajnych i jest bliskie wartościom $C_{atom}(300\text{ K})$ niektórych indywidualnych chondrytów zwyczajnych: chondrytu Pułtusk H5 (17,1–17,2 J/(molK)) oraz chondrytu Gao-Guenie H5 (17,4–18,0 J/(molK)) (tab. 1).

W 1998 r. Maj zastosował prawo Neumanna-Koppa, głoszące, że ciepło molowe mieszaniny stałej przy stałym ciśnieniu jest równe sumie ciepła atomowego jego składników. Określił średnie ciepło atomowe wielu tlenkowych i krzemianowych minerałów ziemskich istotnych dla litosfery ziemskiej (Maj, 1998). Zakres wartości średniego ciepła atomowego minerałów ziemskich mieści się w przedziale 15–21 J/(molK), a wyznaczona przez Maję wartość średnia ciepła atomowego w temperaturze pokojowej, wspólna dla 63 minerałów, obejmujących krzemiany i tlen-

Tab. 1. Ciepło właściwe (C_p), objętościowe ciepło właściwe ($C_{volumetric}$) oraz średnie ciepło atomowe (C_{atom}) chondrytu H4 Jezersko i chondrytów zwyczajnych grupy H**Table 1.** Specific heat capacity (C_p), volumetric heat capacity ($C_{volumetric}$), and mean atomic heat (C_{atom}) of the Jezersko H4 chondrite and H chondrites

Właściwość fizyczna <i>Physical property</i>	Jezersko (H4)		Chondryty H / H Chondrites	
	200 K	~300 K	200 K	~300 K
C_p [J/(kgK)]	529±15 $C_p(d_{bulk})/1,33$	703±15 $C_p(d_{bulk})W2$		695–740 (Beech i in., 2009)
				695–737 (Alexeyeva, 1958)
				714 (Yomogida, Matsui, 1983)
			543 (Macke i in., 2019)	717 (Macke i in., 2019)
				640 (Ghosh, McSween, 1999)
				695 – Misshof H5 (Alexeyeva, 1958)
		709±24 $C_p(A_{mean}) W2$		737 – Zhovtnevyi H6 (Alexeyeva, 1958)
			504±27 (Ostrowski, Bryson, 2019)	726±18 (Ostrowski, Bryson, 2019)
			~490 (Consolmagno i in., 2016; Macke i in., 2016)	719 (Macke i in., 2016)
		705–710 $C_p(A_{mean}(Fe/Si)) W2$		732±8 – Gao-Guenie H5 (Beech i in., 2009)
		696 $C_p(A_{mean}(Fe/Si)) W0$		740±32 – Gao-Guenie H5 (Beech i in., 2009)
				719 – Gao-Guenie H5 (Macke i in., 2019)
				726 – Jilin H5 (Beech i in., 2009)
				727 – Barbotan H5 (Macke i in., 2019)
	758±138 $C_p(C_{volumetric}) 293 K$	535 – Pułtusk H5 (Macke i in., 2019)	685 – Pułtusk H5 (Macke i in., 2019)	
$C_{volumetric}$ [MJ/(m ³ K)]	1,8±0,1	2,3±0,1	1,9* – Jilin H5	2,5* – Jilin H5
		2,50±0,4 $C_{volumetric}(d)$	1,9* – Gao-Guenie H5	2,5–2,6* – Gao-Guenie H5
			1,9* – Barbotan	2,6* – BarbotanH5
			1,9 – Pułtusk H5	2,4 – Pułtusk H5
				2,5* – Zhovtnevyi H6
C_{atom} [J/(molK)]	13,1±0,4	17,4±0,4	13,4** – Pułtusk H5	17,1–17,2** – Pułtusk H5
				17,4–18,0** – Gao-Guenie H5
				18,4** – Jilin H5

* $C_{volumetric}$ chondrytów: Barbotan, Gao-Guenie, Jilin i Zhovtnevyi obliczono wykorzystując literaturowe wartości C_p oraz d_{bulk} (Alexeyeva, 1958; Wilkison, Robinson, 2000; Beech i in., 2009; Macke, 2010; Macke i in., 2019)

* $C_{volumetric}$ of the Barbotan, Gao-Guenie, Jilin and Zhovtnevyi chondrites was calculated using literature data on C_p and d_{bulk} (Alexeyeva, 1958; Wilkison, Robinson, 2000; Beech et al., 2009; Macke, 2010; Macke et al., 2019)

** C_{atom} chondrytów: Gao-Guenie, Jilin i Pułtusk obliczono wykorzystując wartości literaturowe C_p (Beech i in., 2009; Macke i in., 2019) oraz wartości A_{mean} wyznaczone przez autora (np. Szurgot, 2015b)

** C_{atom} of the Gao-Guenie, Jilin, and Pułtusk chondrites was calculated using literature data on C_p (Beech et al., 2009; Macke et al., 2019) and A_{mean} values determined by the author (e.g. Szurgot, 2015b)

ki, wyniosła: (18,4 ± 1,3) J/(molK) (Maj, 1998). Wartość ta jest o ok. 5% większa niż średnie ciepło atomowe chondrytów zwyczajnych.

Z równania [2] wynika zależność ciepła właściwego (C_p) od średniego ciężaru atomowego (A_{mean}):

$$C_p = \frac{C_{atom}}{A_{mean}} \quad [3]$$

gdzie:

C_p – ciepło właściwe [J/(kgK)],

C_{atom} – ciepło atomowe [J/(molK)],

A_{mean} – ciężar atomowy [g/mol].

Zależność ciepła właściwego chondrytów zwyczajnych od ich średniego ciężaru atomowego $C_p(A_{mean})$, dla wspólnej uśrednionej wartości ciepła atomowego chondrytów wynosi:

$$C_p(A_{mean}, 300\text{K}) = \frac{(17,5 \pm 0,6) \times 10^3}{A_{mean}} \quad [4]$$

gdzie:

$C_p(A_{mean}, 300\text{K})$ – zależność ciepła właściwego chondrytów zwyczajnych od ich średniego ciężaru atomowego [J/(kgK)].

Wprowadzenie do równania [4] czynnika 10^3 jest wynikiem wyrażenia jednostek ciepła właściwego C_p w J/(kg K), a nie w J/(gK).

Po podstawieniu wartości liczbowej A_{mean} (skład chem.) = 24,68 g/mol, obliczonej dla meteorytu Jezersko na podstawie jego składu chemicznego w stopniu zwietrzenia W2 (Szurgot, 2019), zgodnie z równaniem [4] w temperaturze pokojowej otrzymujemy wartość zależności $C_p(A_{mean}) = 709 \pm 24$ J/(kgK). Wartość ciepła właściwego chondrytu Jezersko wynikająca z zależności $C_p(A_{mean})$ jest bardzo bliska wartości uzyskiwanej na podstawie zależności $C_p(d_{bulk})$ 703 ± 15 J/(kgK).

Równanie [4] można także stosować dla wartości A_{mean} obliczonych z różnych zależności A_{mean} (wielkość fizyczna). Dla chondrytu Jezersko $A_{mean}(Fe/Si) = 24,66 \pm 0,24$ g/mol, stąd $C_p(A_{mean}(Fe/S)) = 710 \pm 31$ J/kgK, a dla $A_{mean}(d_{grain}) = 24,82 \pm 0,54$ g/mol otrzymujemy $C_p(A_{mean}(Fe/S)) = 705 \pm 40$ J/(kgK). Wielkość fizyczna oznaczona jako d_{grain} to gęstość ziaren meteorytu. Oznacza to, że w temperaturze 300 K ciepło właściwe tego meteorytu o stopniu zwietrzenia W2 mieści się w przedziale wartości 705–710 J/(kgK), tj. bardzo blisko wartości $C_p(d_{bulk})$.

Ciężar atomowy nie zwietrzałego chondrytu Jezersko (tj. w stopniu zwietrzenia W0) wynosi $A_{mean}(W0) = 25,13$ g/mol (Szurgot, 2019), a ciepło właściwe wyliczone z równania [4] wynosi $C_p(W0) = 696 \pm 24$ J/(kgK). I ta wartość jest bliska wartości $C_p(d_{bulk})$ w temperaturze 300 K. Różnica $C_p(W2) - C_p(W0) = 7 - 14$ J/(kgK). Oznacza to, że wietrzenie meteorytu Jezersko (do stopnia zwietrzenia W2) i prawdopodobnie także innych chondrytów z grupy H powoduje wzrost ciepła właściwego $C_p(300\text{K})$ o ok. 1–2%.

Zgodnie z równaniem [4], w którym wykorzystano wspólne ciepło atomowe chondrytów zwyczajnych, ciepło właściwe chondrytu H5 Gao-Guenie ($A_{mean}(Fe/Si) = 24,26 \pm 0,05$ g/mol) w temperaturze 300 K wynosi $C_p(300\text{K}) = 721 \pm 26$ J/(kgK), a eksperymentalne dane dla Gao-Guenie to: $C_{pexp}(300\text{K}) = 719$ J/(kgK) (Macke i in., 2019), oraz $C_{pexp}(350\text{K}) = 732 \pm 8$ J/(kgK) i 740 ± 28 J/(kgK) (Beech i in., 2009). Podany przykład względnie dobrej zgodności przewidywań wartości ciepła właściwego na podstawie zależności $C_p(A_{mean})$ dowodzi poprawności równania [4].

Podstawienie do równania [4] średnich wartości ciężaru atomowego (A_{mean}) trzech grup chondrytów zwyczajnych: 23,0 g/mol – grupy LL, 23,70 g/mol – grupy L oraz 24,91 g/mol – grupy H (Szurgot, 2015a), prowadzi do uzyskania następujących średnich wartości $C_p(A_{mean})$ w temperaturze 300 K: 761 ± 26 J/(kgK) dla grupy LL, 738 ± 25 J/(kgK) dla grupy L oraz 703 ± 24 J/(kgK) dla grupy H. Wyniki obliczeń na podstawie równania [4] dowodzą, że średnie ciepło właściwe różnych grup chondrytów zwyczajnych mieści się w zakresie 703–761 J/(kgK) i spełnia nierówność:

$$C_{pLL}(761\text{J}/(\text{kgK})) > C_{pL}(738\text{J}/(\text{kgK})) > C_{pH}(703\text{J}/(\text{kgK})) \quad [5]$$

Różnica pomiędzy średnim ciepłem właściwym $C_p(300\text{K})$ chondrytów grupy L i H wynosi: $C_{pL} - C_{pH} = 35$ J/(kgK), a różnica pomiędzy C_p grupy LL i grupy L jest równa: $C_{pLL} - C_{pL} = 23$ J/(kgK). Taki stan rzeczy wynika z przyjęcia wspólnego ciepła atomowego C_{atom} – jednakowego dla wszystkich grup chondrytów zwyczajnych – oraz z faktu większej zawartości minerałów ciężkich, kamacytu i taenitu w grupie H względem grup L oraz LL, a to skutkuje największym średnim ciężarem atomowym A_{mean} grupy H, średnim grupy L i najmniejszym grupy LL.

Macke i współautorzy (2016) na podstawie eksperymentalnych danych odnośnie wybranych chondrytów zwyczajnych wskazali zależność średniego ciepła właściwego grup chondrytów: LL, L oraz H od temperatury $C_p(T)$. Dla zakresu temperaturowego 75–300 K jest ona wyrażona wzorem:

$$C_p(T) = a + b \times T + \frac{c}{T^2} - \frac{d}{T^{1/2}} \quad [6]$$

gdzie:

T – temperatura bezwzględna meteorytu [K],

C_p – ciepło właściwe meteorytu [J/(kgK)],

a , b , c oraz d – stałe różne dla poszczególnych grup chondrytów zwyczajnych.

Wartości stałych dla grupy H wynoszą: $a = 1375,1$, $b = 0,28159$, $c = 1,5691 \times 10^6$, $d = 1,3124 \times 10^4$, dla grupy L: $a = 1410,6$, $b = 0,34728$, $c = 1,7046 \times 10^6$, $d = 1,3645 \times 10^4$, dla grupy LL: $a = 1434,5$, $b = 0,36192$, $c = 1,7880 \times 10^6$, $d = 1,3971 \times 10^4$ (Macke i in., 2016).

Z równania [6] wynikają następujące średnie wartości C_p różnych grup chondrytów zwyczajnych:

□ grupa H

– $C_{pH}(300\text{K}) = 719$ J/(kgK), $C_{pH}(200\text{K}) = 543$ J/(kgK);

□ grupa L

– $C_{pL}(300\text{K}) = 746$ J/(kgK), $C_{pL}(200\text{K}) = 558$ J/(kgK);

□ grupa LL

– $C_{pLL}(300\text{K}) = 756$ J/(kgK), $C_{pLL}(200\text{K}) = 564$ J/(kgK).

Wyniki otrzymane z równania [6] wskazują, że średnie ciepło właściwe różnych grup chondrytów zwyczajnych w temperaturze 300 K obejmuje wartości 719–756 J/(kgK) i spełnia nierówność:

$$C_{pLL}\left(756 \frac{\text{J}}{(\text{kg} \times \text{K})}\right) > C_{pL}\left(746 \frac{\text{J}}{(\text{kg} \times \text{K})}\right) > C_{pH}\left(719 \frac{\text{J}}{(\text{kg} \times \text{K})}\right) \quad [7]$$

Natomiast w temperaturze 200 K obejmuje zakres wartości 543–564 J/(kgK) i spełnia nierówność:

$$C_{pLL}\left(564 \frac{\text{J}}{(\text{kg} \times \text{K})}\right) > C_{pL}\left(558 \frac{\text{J}}{(\text{kg} \times \text{K})}\right) > C_{pH}\left(543 \frac{\text{J}}{(\text{kg} \times \text{K})}\right) \quad [8]$$

Wartości ciepła właściwego wyliczone na podstawie równania [4] (zależność $C_p(A_{mean})$), a prezentowane w nierówności [5] są w temperaturze 300 K zbliżone do otrzymanych z równania [6], tj. danych eksperymentalnych wyrażonych zależnością $C_p(T)$.

Błędy względne pomiarów ciepła właściwego meteorytów są zwykle rzędu 1–4%, a współczesne techniki eksperymentalne pozwalają uzyskać niepewność rzędu 0,5–1% (Macke i in., 2016, 2019). Nie można jednak wykluczyć możliwości pewnej niereprezentatywności niektórych próbek meteorytów, zwłaszcza małych, i nieunikniony rozrzut wartości C_p w ramach jednego meteorytu. Oznacza to, że eksperymentalne wartości ciepła właściwego chondrytów zwyczajnych nadal mogą być wyznaczane z dokładnością rzędu 2–3%. Przyjęcie błędu względnego 2–3% pomiarów C_p oznacza w temperaturze pokojowej błędy bezwzględne pomiarów ciepła właściwego chondrytów H: 14–21 J/(kgK), chondrytów L: 15–22 J/(kgK) oraz chondrytów LL: 15–23 J/(kgK). Prowadzi to do występowania bardzo zbliżonych eksperymentalnych wartości ciepła właściwego poszczególnych chondrytów grup: C_{pLL} , C_{pL} i C_{pH} .

Dane otrzymane z równania [6] umożliwiają określenie stosunku $C_p(300\text{ K})/C_p(200\text{ K})$ różnych grup chondrytów zwyczajnych. W grupie H: $C_{pH}(300\text{ K})/C_{pH}(200\text{ K}) = 1,32$, w grupie L: $C_{pL}(300\text{ K})/C_{pL}(200\text{ K}) = 1,34$, w grupie LL: $C_{pLL}(300\text{ K})/C_{pLL}(200\text{ K}) = 1,34$. A to daje średnią $C_p(300\text{ K})/C_p(200\text{ K}) = 1,33 \pm 0,01$, wspólną dla wszystkich trzech grup chondrytów. Tę średnią wartość stosunku $C_p(300\text{ K})/C_p(200\text{ K})$ wykorzystano do określenia ciepła właściwego chondrytu Jezersko w temperaturze 200 K.

Wyliczane w niniejszej pracy wartości ciepła właściwego chondrytu Jezersko mieszczą się w zakresie wartości C_p dotychczas zmierzonych i przewidywanych teoretycznie dla chondrytów zwyczajnych (tab. 1). Yomogida i Matsui (1983) na podstawie składu chemicznego meteorytów określili wartości $C_p(300\text{ K})$ na 714 J/(kgK) dla grupy H oraz 728 J/(kgK) dla grupy L chondrytów zwyczajnych. Pomiar Alexeyevy (1958) ujawniły następujące zakresy wartości C_p (~284 K): grupa H: 695–737 J/(kgK), grupa L: 707–762 J/(kgK) i grupa LL: 695–1000 J/(kgK). Najnowsze dane eksperymentalne wskazują wartości $C_p(300)$ indywidualnych chondrytów H5: Pułusk – 685 J/(kgK) oraz Barbotan – 727 J/(kgK) (Macke i in., 2019).

Pojemność cieplna reprezentuje energię wymaganą do zmiany temperatury całej masy ciała o jednostkę: $C = dQ/dT = C_p \times M$. Objętościowe ciepło właściwe $C_{volumetric}$ (J/(m³K)) reprezentuje energię wymaganą do zmiany temperatury jednostki objętości substancji o jednostkę temperatury: $C_{volumetric} = V^{-1} \times dQ/dT$.

Objętościowe ciepło właściwe Jezerska określono stosując wzór:

$$C_{volumetric} = C_p \times d_{bulk} \quad [9]$$

W warunkach temperatury pokojowej (298–300 K) i $C_p(d_{bulk}) = 703 \pm 15$ J/(kgK) objętościowe ciepło właściwe meteorytu Jezersko wynosi $2,32 \pm 0,12$ MJ/(m³K) $\approx 2,3 \pm 0,1$ MJ/(m³K) i jest bliskie wartości charakterystycznej dla meteorytów kamiennych: 2,5 MJ/(m³K) (Szurgot, 2011) oraz innych chondrytów zwyczajnych grupy H, m.in. chondrytu Pułusk (H5) – 2,4 MJ/(m³K), chondrytu Gao-Guenie (H5) – 2,5–2,6 MJ/(m³K) oraz chondrytu Jilin (H5) – 2,5 MJ/(m³K). Przyjmując do obliczeń temperaturę 200 K i $C_p(d_{bulk}) = 529 \pm 15$ J/(kgK), $C_{volumetric}$ chondrytu Jezersko wynosi $1,75 \pm 0,09$ MJ/(m³K) $\approx 1,8 \pm 0,1$ MJ/(m³K) i jest porównywalne z objętościowym ciepłem właściwym chondrytów Pułusk, Gao-Guenie oraz Jilin: 1,9 MJ/(m³K).

Dane analizy ciepła właściwego i objętościowego ciepła właściwego minerałów i skał ziemskich opublikowali

Waples i Waples (2004). Dla minerałów o niskiej i średniej gęstości (tj. pomiędzy 2 a 4 g/cm³) w temperaturze pokojowej (293 K) otrzymali oni wyrażenie na zależność objętościowego ciepła właściwego od gęstości d :

$$C_{volumetric} \left[\frac{J}{(cm^3 \times K)} \right] = 1,0263 \times \exp(0,2697 \times d \left[\frac{g}{cm^3} \right]) \quad [10]$$

Błąd standardowy $\Delta C_{volumetric}$ – popełniany przy określaniu $C_{volumetric}$ – został przez nich oszacowany na $0,38$ J/(cm³K) $\approx 0,4$ MJ/(m³K).

Zakładając, że związek ten opisuje także materię chondrytów zwyczajnych, przewidywana wartość objętościowego ciepła właściwego chondrytu Jezersko ($d_{bulk} = 3,3 \pm 0,1$ g/cm³) w temperaturze pokojowej wynosi $C_{volumetric} = 2,5 \pm 0,4$ MJ/(m³K) i jest nieco większa, ale zbliżona do wartości $C_{volumetric}$ meteorytu Jezersko: $2,3 \pm 0,1$ MJ/(m³K), wyznaczonej wcześniej z równania [9] i wartości $C_p = 703$ J/(kgK). Błąd względny przewidywania wynikającego z równania [10] wynosi 15%, a z równania [9] jest rzędu 5%.

Równania [9] oraz [10] prowadzą do następującej wartości $C_p(293\text{ K})$ chondrytu Jezersko:

$$C_p(293\text{ K}) = \frac{C_{volumetric}(293\text{ K})}{d_{bulk}} = 758 \pm 138 \frac{J}{(kg \times K)} \quad [11]$$

Wartość ta jest obciążona znacznym błędem, wynoszącym około 18%. Zdaniem autora jest ona także zawyżona i reprezentuje raczej krzemiany, a nie całą skałę meteorytu. Dane termofizyczne prezentowane w niniejszej pracy dla dwóch temperatur – 200 K i 300 K – wskazują, że wszystkie wartości otrzymane dla chondrytu Jezersko: C_p , C_{atom} i $C_{volumetric}$, mieszczą się w zakresie chondrytów zwyczajnych, zwłaszcza w zakresie grupy H (tab. 1). Wyniki niniejszej pracy potwierdzają, że wartości C_p , C_{atom} oraz $C_{volumetric}$ różnych grup chondrytów zwyczajnych, zwłaszcza grup H i L, obejmują ten sam przedział wartości w temperaturze pokojowej. Oznacza to, że wymienione wielkości termofizyczne nie zawsze umożliwiają jednoznaczne przyporządkowanie chondrytu do określonej grupy: LL, L czy H.

W jednej z prac poświęconych modelowaniu ewolucji cieplnej ciała macierzystego chondrytów grupy H, gdzie przyjęto asteroidę 6 Hebe jako potencjalne ciało macierzyste chondrytów H, wykorzystywano zmienną wartość ciepła właściwego i temperaturę powierzchni planetoidy równą 225 K (Henke i in., 2012 i prace tam cytowane). We wcześniejszych modelach cieplnych tej planetoidy przyjmowano temperaturę powierzchniową planetoidy 200 K lub 300 K, a ciepło właściwe materii planetoidy było traktowane albo jako wielkość stała (625 J/(kgK)) lub wielkość zmieniająca się w czasie ewolucji planetoidy (Henke i in., 2012 i prace tam cytowane).

Współzależność ciepła właściwego, ciepła atomowego i średniego ciężaru atomowego $C_p(C_{atom}, A_{mean})$, podobnie jak i inne zależności: $C_p(d_{bulk})$ i $C_p(T)$, umożliwiają prognozowanie i weryfikowanie ciepła właściwego, ciepła atomowego i średniego ciężaru atomowego chondrytów zwyczajnych i ich ciał macierzystych.

WNIOSKI

Niniejsza praca prezentuje wyniki teoretycznych przewidywań ciepła właściwego i ciepła atomowego meteorytu Jezersko, sklasyfikowanego przez wcześniejszych badaczy jako chondryt zwyczajny H4, S2(3), W2.

1) Ustalono, że ciepło właściwe meteorytu Jezersko, przewidywane na podstawie różnych zależności, w temperaturze pokojowej mieści się w zakresie 696–758 J/(kgK), a ciepło właściwe tego meteorytu wynikające z zależności $C_p(d_{bulk})$ wynosi 703±15 J/(kgK) w temperaturze 300 K oraz 529±15 J/(kgK) w temperaturze 200 K.

2) Ciepło właściwe C_p meteorytu Jezersko oszacowane na podstawie zależności od ciepła atomowego i średniego ciężaru atomowego wynosi 709±24 J/(kgK) w temperaturze 300 K i jest bliskie średniej wartości C_p otrzymanej z tej samej zależności dla chondrytów grupy H: 703±24 J/(kgK) oraz bliskie średniej wartości 719±24 J/(kgK), określonej przez Macke'a i współautorów (2016) dla chondrytów H.

3) Przewidywania ciepła właściwego na podstawie równania Waplesa i Waplesa (2004), opisującego minerały ziemskie, prowadzą do zawyżonej wartości $C_p(d_{bulk}, 294 K) = 758 J/(kgK)$ chondrytu Jezersko.

4) Zależność ciepła właściwego chondrytów zwyczajnych od ich średniego ciężaru atomowego $C_p(A_{mean})$, wobec wspólnej, uśrednionej wartości ciepła atomowego chondrytów (17,5 J/(molK) w temperaturze 300 K, i oczekiwane $C_{atom}(200 K) \approx C_{atom}(300 K)/1,33 \approx 13,2 J/(molK)$) to prosty w formie i ważny dla meteorytyki związek analityczny.

5) Przewidywane średnie ciepło atomowe C_{atom} chondrytu Jezersko wynosi 17,4±0,4 J/molK w temperaturze 300 K oraz 13,1±0,4 J/(molK) w temperaturze 200 K.

6) W temperaturze pokojowej (~300 K) objętościowe ciepło właściwe meteorytu Jezersko wynosi: 2,3±0,1 MJ/(m³K), a w temperaturze 200 K jest niższe i wynosi: 1,8±0,1 MJ/(m³K). Obie wartości $C_{volumetric}$ są bliskie tym otrzymanym dla innych chondrytów zwyczajnych grupy H: 2,4–2,6 MJ/(m³K) w warunkach 300 K oraz 1,9 MJ/(m³K) w temperaturze 200 K.

Określenie ciepła właściwego chondrytu H4 Jezersko i innych chondrytów zwyczajnych może być przydatne do modelowania ciał macierzystych chondrytów H, L oraz LL – potencjalnych źródeł cennych surowców pozaziemskich.

Autor serdecznie dziękuje żonie mgr farm. Jadwidze Szurgot za wsparcie, okazaną pomoc i konsultacje podczas badań. Profesorowi Andrzejowi Muszyńskiemu oraz anonimowemu recenzentowi autor wyraża wdzięczność za wartościowe i konstruktywne sugestie dotyczące prezentacji wyników badań.

LITERATURA

ALEXEYEV K. 1958 – Physical properties of stony meteorites and their interpretation based on the hypothesis on the origin of meteorites. *Meteoritics*, 16: 67–77.
BEECH M., COULSON I.M., NIE W., MCCAUSLAND P. 2009 – The thermal and physical characteristics of the Gao-Guenie (H5) meteorite. *Planet. Space Sci.*, 57: 764–770.
CONSOLMAGNO G.J., SCHAEFER M.W., SCHAEFER B.E., BRITT D.T., MACKE R.J., NOLAN M.C., HOWELL E.S. 2013 – The measurement of meteorite heat capacity at low temperatures using liquid nitrogen vaporization. *Planet. Space Sci.*, 87: 146–156.
ČERMÁK V., RYBACH L. 1982 – Thermal properties. [W:] Hellwege K.-H. (red.), Landolt-Bornstein numerical data and functional relationships in science and technology: New Series, Group V. Geophysics and Space Research, v. 1 Physical Properties of Rocks, Subvolume a: Springer-Verlag, Berlin, 305–371.

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: 269–298.
GHOSH A., MCSWEEN H.Y. 1999 – Temperature dependence of specific heat capacity and its effect on asteroid thermal models. *Meteoritics & Planetary Science*, 34: 121–127.
HENKE S., GAIL H.P., TRIELOFF M., SCHWARTZ W.H., KLEINE T. 2012 – Thermal history modeling of the H chondrite parent body. *Astron. Astrophys.*, 545: A135.
HORAI K. 1971 – Thermal conductivity of rock-forming minerals. *J. Geophys. Res.*, 76: 1278–1308.
<https://www.asteroidmission.org/>
<https://en.wikipedia.org/wiki/OSIRIS-REx>
<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/>
https://en.wikipedia.org/wiki/NEAR_Shoemaker
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hayabusa>
<http://neo.ssa.esa.int/risk-page>
<https://www.esa.int/>
<https://satrevolution.com/mars/>
https://www.nasa.gov/mission_pages/insight/overview/index.html
ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A. 2019 – Potential deposits of selected metallic resources on L chondrite parent bodies. *Planet. Space Sci.*, 168: 40–51.
ŁUSZCZEK K., WACH R.A. 2014 – NWA 6255 meteorite – Thermophysical properties of interior and the crust. *Meteoritics*, 3: 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., OPEIL C.P., CONSOLMAGNO G.J., BRITT D.T. 2016 – Ordinary chondrites heat capacities below 350 K. *Lunar and Planetary Science Conference 47th*, Abstract: 1221.
MACKE R.J., OPEIL C.P., CONSOLMAGNO G.J. 2019 – Heat capacities of ordinary chondrite falls below 300 K. *Meteorit. Planet. Sci.*, 54: 2729–2743.
MATSUI T., OSAKO M. 1979 – Thermal property measurement of Yamato meteorites. *Memoirs of National Institute of Polar Research*, Sp. issue, 15: 243–252.
MAJS. 1998 – Phonon thermal conductivity of geomaterials: Relationship to the density and mean atomic weight. *Acta Geoph. Polon.*, 46: 415–425.
MILER M., AMBROŽIČ B., MITRIČ B., GOSAR M., ŠTURM S., DOLENEC M., JERŠEK M. 2014 – Mineral and chemical composition of the Jezersko meteorite – a new chondrite from Slovenia. *Meteorit. Planet. Sci.*, 49: 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. *Meteorit. Planet. Sci.*, 47: 319–329.
OSTROWSKI D., BRYSON K. 2019 – The physical properties of meteorites. *Planet. Space Sci.*, 165: 148–178.
PRZYLIBSKI T.A. 2016 – Chondryt Sołtmany. *Acta Soc. Meteorit. Polon.*, 7: 93–122.
ROBIE R. A., HEMINGWAY B. S., FISHER J. R. 1978 – Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10⁵ Pascals) pressure and at higher temperatures. *U.S. Geol. Survey Bull.* 1259: 456.
SZURGOT M. 2011 – On the specific heat capacity and thermal capacity of meteorites. *Lunar and Planetary Science Conference XXXII*, #1150.pdf, LPI Contribution No. 1608: 1150.
SZURGOT M. 2015a – Średni ciężar atomowy chondrytu Sołtmany, chondrytów L6 i minerałów pozaziemskich. *Acta Soc. Meteorit. Polon.*, 6: 107–128.
SZURGOT M. 2015b – Mean atomic weight of Pułtusk meteorite and H chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50(S1): #5013.pdf.
SZURGOT M. 2019 – Średni ciężar atomowy i gęstość ziaren chondrytu Jezersko (H4). *Acta Soc. Meteorit. Polon.*, 10: 140–159.
SZURGOT M., WACH R.A., PRZYLIBSKI T.A. 2012 – Thermophysical properties of the Sołtmany meteorite. *Meteoritics*, 2, 53–65.
WAPLES D. W., WAPLES J. S. 2004 – A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks. *Natural Resour. Res.*, 13 (2): 123–130.
WILKISON S.L., ROBINSON M.S. 2000 – Bulk density of ordinary chondrite meteorites and implications for asteroidal internal structure. *Meteorit. Planetary Sci.*, 35: 1203–1213.
WOOD J.A. 1963 – Physics and chemistry of meteorites. [W:] Kuiper G.P., Middlehurst B. (red.), *The Moon Meteorites and Comets*. The University of Chicago Press, Chicago, 337–401.
YOMOGIDA K., MATSUI T. 1983 – Physical properties of ordinary chondrites. *J. Geoph. Res.*, 88: 9513–9533.

Praca wpłynęła do redakcji 19.08.2019 r.
Akceptowano do druku 11.12.2019 r.