

OLSZTYŃSKIE PLANETARIUM I OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE
POLSKIE TOWARZYSTWO METEORYTOWE
II SEMINARIUM METEORYTOWE
24-26.04.2003 OLSZTYN

Marian SZURGOT¹

**WŁASNOŚCI TERMOFIZYCZNE METEORYTÓW,
CIEPŁO WŁAŚCIWE**

Określenie właściwości termofizycznych materii tworzącej planetoidy i planety jest ważne dla modeli ich cieplnej ewolucji, historii powstawania oraz przewidywań stanu przyszłego. Celem badań było określenie ciepła właściwego meteorytów żelaznych, żelazno-kamiennych oraz kamiennych, zarówno chondrytów jak i achondrytów.

W niniejszej pracy zmierzono i zanalizowano wartości ciepła właściwego trzynastu meteorytów - przedstawicieli wszystkich głównych klas: meteorytów żelaznych, żelazno-kamiennych i kamiennych w temperaturze pokojowej. Badania objęły dużą grupę meteorytów, również meteoryty saharyjskie odkryte w ostatnich latach, których właściwości fizyczne dotąd nie zostały poznane. Określono także gęstość i średnią zawartość pierwiastków tworzących minerały meteorytów.

1. Prezentacja i charakterystyka badanych meteorytów

Pomiary ciepła właściwego były poprzedzone charakteryzacją badanych meteorytów, głównie analizą składu chemicznego i identyfikacją minerałów. Do charakteryzacji meteorytów wykorzystywano mikroskopy optyczne, skaningowe mikroskopy elektronowe i mikroanalizator rentgenowski. Do ujawnienia struktury Widmanstattena w meteorytach żelaznych i lepszego rozdzielenia minerałów w różnych grupach meteorytów wykorzystywano trawienie chemiczne. Metody te pozwoliły określić średni i lokalny skład chemiczny oraz ujawnić i zidentyfikować różne fazy tworzące meteoryty.

Wyniki badań zawartości pierwiastków oraz minerałów tworzących meteoryty żelazne Morasko i Gibeon a także chondrytów Gold Basin i El Hammami zostały opisane w oddzielnych pracach (Roźniakowski i in. 2004, Szurgot i in. 2004). Rysunki 1-3 prezentują wygląd zewnętrzny i topogramy trawienia ukazujące typowe dla materii meteorytowej struktury: regmaglipty na powierzchniach meteorytów żelaznych (Rys.1), struktury Widmanstattena i Neumanna, struktury i pola plessytowe charakterystyczne dla meteorytów żelaznych (Rys. 2), a także makroskopowy obraz chondr i ciasta skalnego chondrytów (Rys. 3). Wszystkie badane

¹*Institut Fizyki Politechniki Łódzkiej, Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki Politechniki Łódzkiej, Wólczajska 219, 93-005 Łódź,
e-mail: mszurgot@lodd.p.lodz.pl , mszurgot@p.lodz.pl*

meteoryty należą do prywatnej kolekcji autora i zawsze można zweryfikować ich autentyczność.

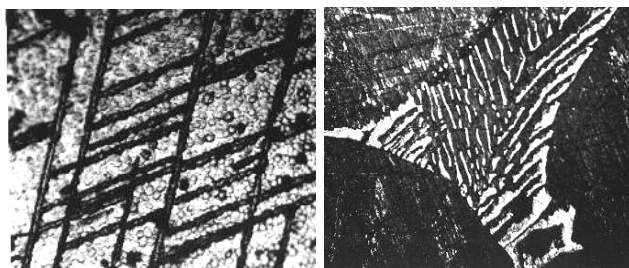
Przykładowe widma rentgenowskie badanych meteorytów pokazano na rysunkach 4, 5 i 6.

Stwierdzono, że zawartość głównych pierwiastków tworzących minerały badanych meteorytów jest porównywalna z wartościami literaturowymi. Dla meteorytów żelaznych otrzymano, że udział procentowy żelaza wynosi 87-92% wagowych, a niklu 4-8% (Rys. 4, Tabela 1). Minerały meteorytów kamiennych typu chondrytów zawierają głównie cztery pierwiastki: tlen (35-42)%, krzem (13-20)%, magnez (10-15)% i żelazo (16-21)% (Tabela 2).

Analiza zawartości pierwiastków w achondrycie daje następujące wyniki -13.2% Fe, 3.3% Mg, 8.9% Ca, 43.9% O, 8.1% Al i 21.9% Si wobec spodziewanych:



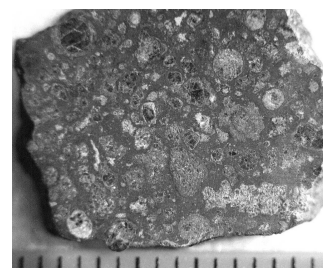
Rys. 1. Regmaglipty na powierzchni meteorytu Sikhote-Alin.



(a)

Rys. 2. (a). Układ dyslokacji tworzący sieć równoległych, dobrze krystalograficznie zorientowanych linii Neumanna w meteorycie żelaznym Toluca. Taki obraz jest zapisem zderzeń meteorytu w przestrzeni międzyplanetarnej.

(b). Topogram trawienia przedstawiający obszar występowania perlitowej struktury plessytu w meteorycie Morasko.



Rys. 3. Obraz makroskopowy chondr w chondrycie węglowym Allende.

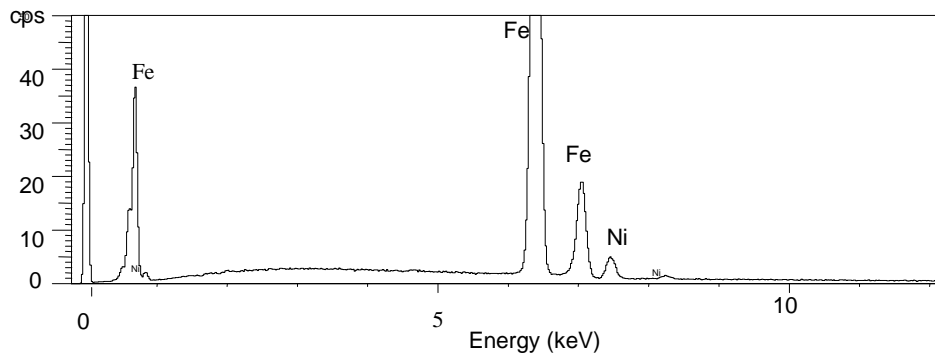
(12-16)% Fe, (4-5)% Mg i (4-5)% Ca (Mason 1962, Buchwald 1975, Krinov 1960, Hurnik i in. 1992). Badany pallasyt wykazuje: 24.1% O, 5% Si, 49.4% Fe, 10.2% Ni, 10.9% Mg i 0.4% S (Tabela 2) wobec spodziewanych (30-70)% Fe, (3-8)% Ni, (25-29)% Mg, 0.2-1% S (Mason 1962, Buchwald 1975, Krinov 1960, Hurnik i in. 1992). Tak więc również w eukrycie i pallasycie średnia zawartość pierwiastków jest zgodna z danymi literaturowymi dla tego samego typu meteorytów.

2. Gęstość meteorytów

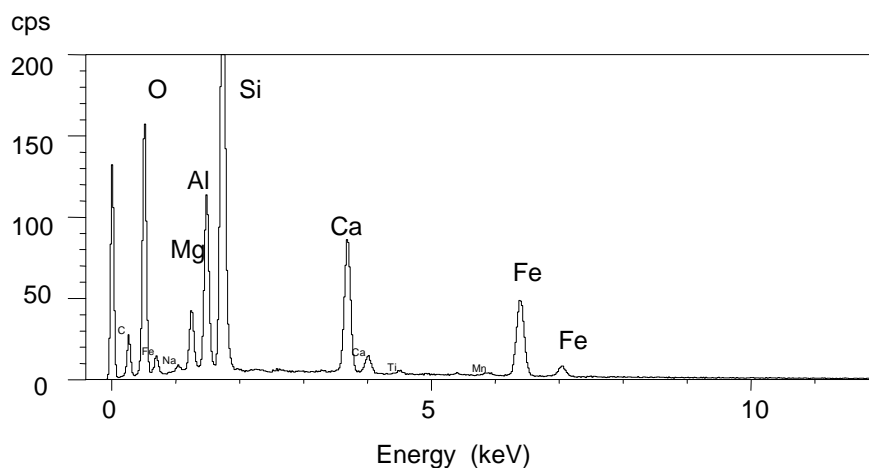
Gęstość meteorytów ρ_m określono wykorzystując prawo Archimedesesa dla wyznaczenia ich objętości V , ze wzoru

$$\rho_m = m_m / V = m_m \rho_w / (m_m - m_{mw}), \quad (1)$$

w którym m_m jest masą meteorytu w powietrzu, m_{mw} – masą otrzymaną z pomiaru podczas jego zanurzenia w wodzie o gęstości ρ_w , a różnica mas $m_m - m_{mw}$ jest masą wypartej wody.



Rys. 4. Widmo EDS meteorytu żelaznego Sikhote-Alin



Rys. 5. Widmo EDS eukrytu HaH 286.

Gęstość badanych meteorytów żelaznych wynosiła od 7.16 do $7.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, meteorytów kamiennych typu chondrytów od 3.04 do $3.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, achondrytu $3.13 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (Tabela 1 i 2). Porównanie gęstości meteorytów badanych w niniejszej pracy z gęstościami innych meteorytów należących do tych samych klas pokazuje dobrą zgodność prace (Mason 1962, Buchwald 1975, Krinov 1960, Manecki 1972, Hurnik i in. 1992, Pokrzywnicki 1974, Wood 1983, Pokrzywnicki 1958). Zastosowana metoda pomiaru gęstości należy do metod wypornościowych (Manecki i in. 1988).

3. Ciepło właściwe meteorytów

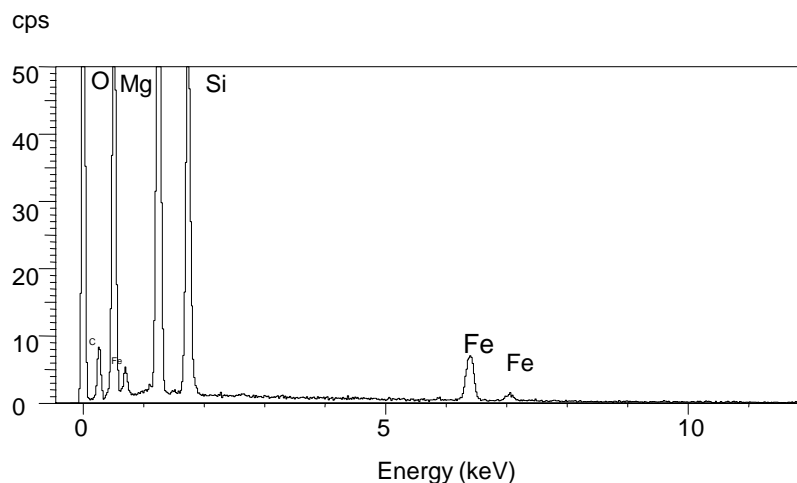
Ciepłem właściwym c nazywamy pojemność cieplną jednostki masy substancji

$$c = C/m, \quad (2)$$

gdzie m – masa ciała, a C jego pojemność cieplna wyrażana w J/K, zgodnie z definicją

$$C = \delta Q/dT, \quad (3)$$

jako stosunku dostarczonego ciepła δQ do zmiany temperatury dT . Pojemność cieplna jest ilością ciepła potrzebną do ogrzania danego ciała o jeden kelwin.



Rys. 6. Widmo EDS pallasytu Brahin.

Pomiarów ciepła właściwego meteorytów pod stałym ciśnieniem c_p dokonywano wykorzystując klasyczny kalorymtr adiabatyczny lub mikrokalorymtr. Stosując zasadę bilansu cieplnego w izolowanym cieplnie układzie ciał c_p określano z zależności

$$c_p = Q / (m_m \Delta T) = (m_k c_k + m_w c_w) \Delta T_k / (m_m \Delta T), \quad (4)$$

gdzie: Q to ciepło dostarczone do próbki meteorytu o masie m_m , w wyniku wymiany cieplnej, a ΔT to przyrost temperatury meteorytu.

Ciepło Q pobrane przez meteoryt określano ze zmian temperatury ΔT_k kalorymetru i zawartej w nim wody. Tutaj m_k i c_k to masa i ciepło właściwe kalorymetru, a m_w i c_w to masa i ciepło właściwe wody.

Wyniki pomiarów ciepła właściwego c_p meteorytów zamieszczono w Tabelach 1 i 2 oraz na rysunkach 7-9. Większość pomiarów ciepła właściwego tu prezentowanych dokonano w temperaturze pokojowej (289-304K) z wykorzystaniem klasycznego kalorymetru, a dla meteorytu Morasko przeprowadzono pomiary zależności temperaturowej c_p stosując różnicowy mikrokalorymtr skaningowy DSC 605 produkcji Unipan. Wyniki badań przewodności cieplnej, dyfuzyjności cieplnej i ciepła właściwego meteorytu żelaznego Morasko Laserową Metodę Impulsową i mikrokalorymetrem skaningowym prezentowane są w oddzielnej publikacji (Roźniakowski i in. 2004).

W Tabeli 3 zamieszczono zestawienie otrzymanych wyników dla różnych grup meteorytów oraz zestawienie wartości c_p dla materii ziemskiej: ziemskich stopów

żelaza oraz minerałów i skał Ziemi, ze szczególnym uwzględnieniem minerałów występujących zarówno na Ziemi jak i w meteorytach.

Meteoryt (klasa)	Zawartość głównych pierwiastków (% wagowe)		Gęstość (10 ³ kg/m ³)	Ciepło właściwe Cp (J/kg K)
	Fe	Ni		
Morasko (III CD/IAB) {1914}z	91.6	6.50	7.30	458 ± 30 ²⁸⁹
	(14:1)			450 ± 20 ²⁸⁹ (DSC)
			7.79	478 ± 10 ²⁹³ (DSC)
			7.16	440 ± 30 ³⁰⁴
		(7.16-7.79)	596 ± 30 ³⁰¹ (440-600)	
Gibeon (IVA) {1836}z	92,04	7.96	7.58	441 ± 82 ²⁸⁶⁻²⁹³
	(12:1)		7.84	435 ± 50 ²⁸⁸⁻²⁹⁰
			7.21	439 ± 30 ²⁸⁹
			(7.21-7.84)	(350-550)
Canyon Diablo (IAB) {1891}z	91.22	6.93	7.81	548 ²⁹³ (Butler 1963)
	(13:1)		4.11 ¹⁾	575 ± 57 ³⁰⁰
Sikhote Alin (IIAB) {1947}s	95.21	4.71	7.67	496 ± 50 ³⁰¹
(20:1)				
Toluca (IAB) {1776}z	87.2	6.2	7.16	520 ± 30 ³⁰⁰
(14:1)				

Tabela 1. Ciepło właściwe, zawartość pierwiastków i gęstość wybranych meteorytów żelaznych w temperaturze pokojowej (288-304K).

{1776}z - rok znaleziska; {1947}s - rok spadku meteorytu; (DSC) - dane uzyskane za pomocą różnicowego mikrokalorymetru skaningowego DSC 605M prod. Unipan.

Cp ± ΔCp²⁹⁹ - w indeksie górnym podano temperaturę pomiaru Cp w K.

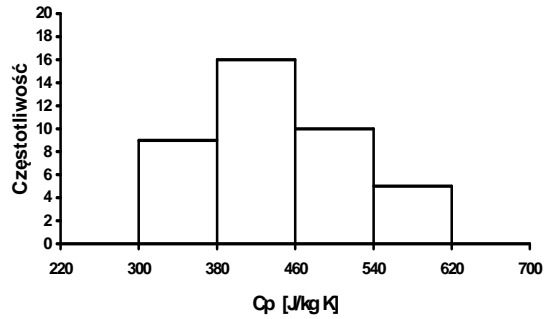
3. Podsumowanie wyników

Wyniki prezentowanych badań pokazują, że ciepło właściwe meteorytów żelaznych (440-600 J/kg K) (Rys. 7-9, Tabela 1, Tabela 3) mieści się w zakresie wartości typowych dla ziemskich stopów żelaza o zbliżonym składzie chemicznym (430-500) J/kgK (Gersten i in. 2001, Kitel 1996, Pampuch 1977, Peckner i in. 1977, Lide 1997, Razniewicz 1966, Lange 1961, Butler i in. 1963), a meteorytów kamiennych (480-920 J/kgK) (Rys. 8 i 9, Tabela 2 i Tabela 3) obejmuje podobny zakres jak ten charakteryzujący skały ziemskie (600-960 J/kgK) (Landoldt-Bornstein 1982, Szymański 1997, Hofmeister 2002, Scharli i in. 2001, Chaplot i in. 2000, Swamy i in. 1997) (Tabela 3). Przedstawiciel meteorytów żelazno-kamiennych

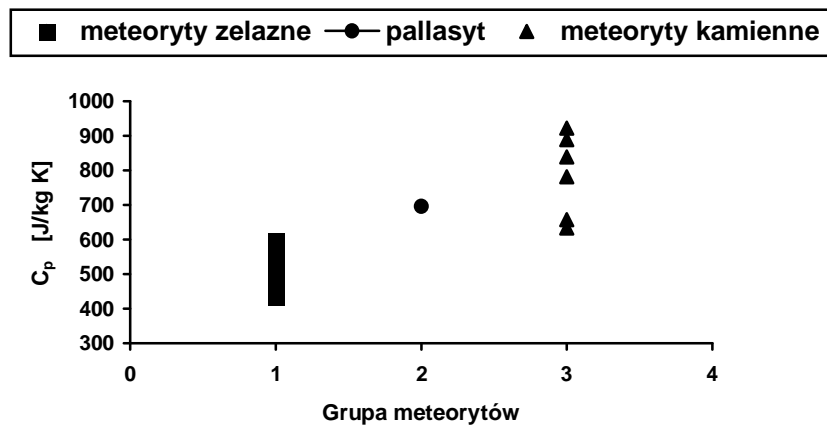
wykazuje wartość ciepła właściwego $c_p = 696 \text{ J/kgK}$, tj. pośrednią pomiędzy meteorytami żelaznymi i kamiennymi, zgodnie z oczekiwaniami. Zamieszczona w Tabeli 3 gęstość materiałów ziemskich pochodzi z prac (Bolewski 1982, Mottana i in. 1998, Modenach i in. 1996, Niemczynow i in 1963, Johnsen 2002, Krauss i in 1959), natomiast wartości C_p materiałów ziemskich z prac (Raźniewicz 1966, Lan-

Meteoryt	Zawartość głównych pierwiastków (% wagowe)	Gęstość (10^3 kg/m^3)	Ciepło właściwe C_p (J/kgK)
Allende (kamienny, chondryt CV3) {1969}s	O(35) Si(13) Mg(10) Fe(18)	3.46	781 ± 150^{289}
El Hammami (kamienny, chondryt H5) {1997}z	O(38.9) Si(18.5) Mg(13.7) Fe(21)	3.51	839 ± 100^{290}
Gold Basin (kamienny, chondryt L4) {1995}z	O(41.8) Si(19.6) Mg(14.5) Fe(16.6)	3.45	888 ± 90^{289}
Sahara 99471 (kamienny, chondryt) {1999}z		3.44	634 ± 30^{298}
Sahara 01xxx (chondryt L3.8) {2001}z		3.44	922 ± 80^{299}
DaG 610 (kamienny, chondryt H4) {1998}z		3.04	483 ± 150^{299}
HaH 286 (achondryt, eukryt) {2000}z	O (43.9) Si(21.9) Mg (3.3) Fe(13.2) Ca(8.9)	3.13	657 ± 90^{290}
Brahin (żelazno-kamienny, pallasyt) {1810}z	Fe (49.4) Ni(10.2) O (24.1) Si(5) Mg (10.9) S(0.4)	4.76	696 ± 90^{290}

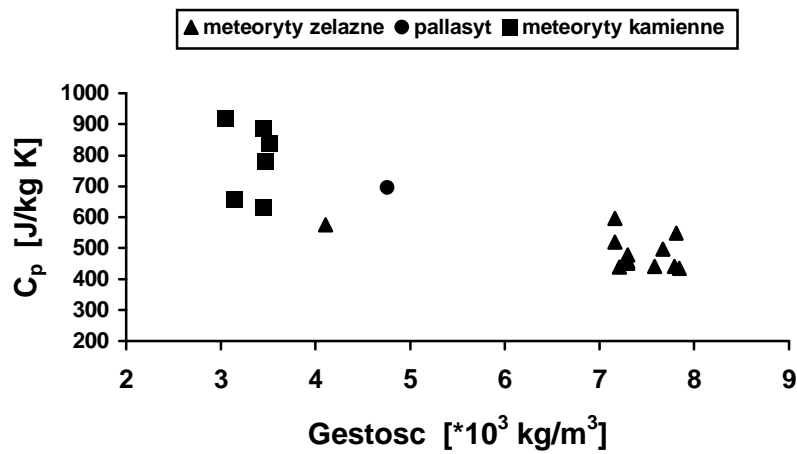
Tabela 2. Ciepło właściwe, zawartość pierwiastków i gęstość wybranych meteorytów kamiennych i żelazno-kamiennych w temperaturze pokojowej (288- 299K), DaG – Dar al Gani, HaH – Hammadah al Hammra.



Rys. 7. Histogram rozkładu wartości C_p w grupie badanych meteorytów żelaznych.



Rys. 8. Rozkład wartości C_p w trzech grupach meteorytów: (1) - żelaznych, (2) - żelazno-kamiennych, (3) - kamiennych.



Rys. 9. Związek ciepła właściwego i gęstości dla materii meteorytowej

Materia ziemiska Cp [J/kgK] (ρ 10 ³ kg/m ³)	Materia planetarna Cp [J/kgK] (ρ)		
	Meteority żelazne	Meteoryt żelazno- kamienny	Meteority kamienne
Fe 448-499 (7.87) Armco 465 (7.87) Ni 444-503 (8.90) Stal nierdz. 430-490 (7.90) Stale węgl. 457-485 AISI 4340 485 (7.86) Zakres Cp = 430-500	gęstość (7.16-7.84) Zakres Cp = 350-596 zwykle Cp = 440-450		Chondryty Zakres Cp = 630-920 zwykle 780-880 Gęstość (3.04-3.51) zwykle (3.4-3.5) Achondryt 660 (3.14)
Oliwiny (3.2-4.4) Fajalit (Fa) 658 (4.38) Forsteryt (Fo) 855 (3.22) Fo ₅₀ Fa ₅₀ 739 (3.76) Fo ₉₀ Fa ₁₀ 828 (3.33)	Fo (Tucson) (3.2)	Oliwin (3.38) (Pallasyt) 696 (4.76)	Bazalt księżycowy Cp = 747 - 783 (Landoldt 1982) Gęstość (2.9-3.5)
Pirokseny Ferrosilit (Fs) 764 (3.2) Enstatyt 789-804 (3.1-3.3) Bronzyt (3.2-3.5) Diopsyd 809 (3.2-3.3) Wollastonit (Wo) 734 - 838 (2.8-3.1) Bazalt 795 - 834 (2.7-3.2) ziemski Granit 720-813 (2.6-2.8) Ortoklaz 859 (2.6) Plagioklaz 750 (2.6-2.8) Kwarc 740 (2.65) Trydymit (2.27) Tektyt (2.3-2.5) Syderyt 813 (4.0) Kalcyt 819 (2.7) Magnetyt 633 (5.2) Korund 779 (3.9-4.1) Serpentyt 960 (2.5-2.7) Zakres Cp = 600-960			Trydymit (2.24-2.27) (Krinov 1960) Troilit (4.68-4.82) (Krinov 1960) Zakres Cp = 630-920

Tabela 3. Ciepło właściwe oraz gęstość meteorytów oraz minerałów i skał ziemskich oraz ziemskich stopów żelaza i niklu w temperaturze pokojowej.

ge 1961, Szymański 1997, Hofmeister 2001, Scharli 2001, Chaplot 2000, Swamy 1997).

Ogólnie można stwierdzić, że wartości ciepła właściwego meteorytów są zbliżone do wartości materiałów ziemskich o zbliżonym składzie chemiczno-

mineralogicznym (Tabela 3 i Rys. 7-9). Dowodzi to jedności materii budującej wszechświat.

4. Wnioski

1. Ciepło właściwe wszystkich badanych grup meteorytów mieści się w zakresie wartości typowych dla materii ziemskiej o zbliżonym składzie chemicznym.

2. Znajomość ciepła właściwego materii planetarnej, jej składu, także gęstości i objętości składników planet i planetoid: jąder, płaszczy i skorup, umożliwia określenie pojemności cieplnej planet i planetoid, a nie tylko ich oszacowanie. Do zrealizowania tego celu potrzebne są wartości c_p dla różnych temperatur i ciśnień.

Wyrażam serdeczne podziękowanie dr Krzysztofowi Polańskiemu z Katedry Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Łódzkiego za wykonanie mikroanalizy rentgenowskiej meteorytów. Panu Andrzejowi Pilskiemu wyrażam głęboką wdzięczność za udostępnienie meteorytów i konsultacje naukowe w trakcie prowadzenia badań. Panu Andrzejowi Kotowieckiemu serdecznie dziękuję za ofiarowanie meteorytu Canyon Diablo.

LITERATURA

- BUTLER C. P., JENKINS R. J., 1963: Thermal properties of meteoritic iron from -150° to 300° C, *Science* 139, 486-487.
- CHAPLOT, S.L., CHOUDHURY, N., 2000: Phase transitions of enstatite $MgSiO_3$: a molecular dynamics study, *Solid State Comm.* 116, 599-603.
- GERSTEN J. I., SMITH F. W., 2001: *The Physics and Chemistry of Materials*, New York, s. 144.
- HURNIK B., HURNIK H., 1992: *Meteoroidy, meteory, meteoryty*, Poznań.
- HOFMEISTER, A.M., 2001: Thermal conductivity of spinels and olivines from vibrational spectroscopy : ambient conditions, *Amer. Miner.* 86, 1188-1208
- KITTEL C., 1996: *Introduction to Solid State Physics*, New York .
- KRINOV E. L., 1960: *Principles of Meteoritics*, New York.
- LIDE D. R., 1997: *CRS Handbook of Chemistry and Physics*, Boca Raton.
- LANGE, N. A., 1961: *Handbook of Chemistry*, 10th ed., New York .
- LANDOLT-BORNSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group 5.: Geophysics and Space Research, Vol. 1(a) Physical Properties of Rocks, 1982: 305-343, Berlin.
- LANDOLT-BORNSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group 5.: Geophysics and Space Research, Vol. 1(b), 1982: 535, Berlin.
- MANECKI, A., SKOWROŃSKI, A., 1988: *Metody badań minerałów i skał*, 48 Warszawa.
- MANECKI A., 1975: *Meteoryty, pyły kosmiczne i skały księżycowe*, Warszawa.
- MASON B., 1962: *Meteorites*, New York.
- PAMPUCH, R., 1977: *Zarys nauki o materiałach* , Warszawa.
- PECKNER D., BERNSTEIN M., 1977: *Handbook of Stainless Steels*, New York

- POKRZYWNICKI, J., 1958: O ciężarze właściwym meteorytów, *Acta Geophys. Polonica* 6(2), 127-152.
- POKRZYWICKI J., 1964: Meteorites of Poland. Catalogue of Meteorites In the Polish Collections, *Studia Geol. Polonica*, vol. 15, Warszawa.
- RAŹNJEWICZ K., 1966: Tablice cieplne z wykresami, Warszawa.
- ROŹNIAKOWSKI, K., SZURGOT, M., WOJTATOWICZ, T.W., 2004: Własności termofizyczne wybranych meteorytów żelaznych, *Materiały konferencyjne II Seminarium Meteorytowego Olsztyn 2003*.
- SZYMAŃSKI, A., *Mineralogia Techniczna*, 1977: Warszawa.
- SCHARLI, U., RYBACH, L., 2001: Determination of specific heat capacity in rock fragments, *Geothermics* 30, 93-110.
- SWAMY, V., DUBROVINSKY, L.S., 1997: Thermodynamics data for the phases in the CaSiO_3 system, *Geochim. Cosmochim. Acta* 61(6), 1181-1191.
- SZURGOT, M., POLAŃSKI, K., 2004: Badania mikroskopowe chondrytów El Hammami i Gold Basin, *Materiały konferencyjne II Seminarium Meteorytowego Olsztyn 2003*.