

Konrad BLUTSTEIN¹

Chondryty węgliste CI oraz podobne do CI

CI and CI-like carbonaceous chondrites

Abstract: Carbonaceous chondrites of the CI group represent the most primitive matter in the Solar System available for study. Currently, only 9 meteorites have been classified as CI group carbonaceous chondrites, with the classification of two of them being questioned. In the literature, there is a suggestion to consider these two meteorites, along with others that share similarities, as a separate CY group. Additionally, the Tagish Lake meteorite is considered CI2, although this classification has not gained widespread acceptance.

Based on a limited number of scientific sources regarding the elemental composition of CI group carbonaceous chondrites and CI-like chondrites, it has been observed that Alais, Ivuna, and Orgueil chondrites have the most similar elemental composition. The composition of the Tonk chondrite differs slightly but still falls within the typical range for CI group chondrites. The chemical composition of the Revelstoke meteorite significantly deviates from the average composition of CI group chondrites; however, the small mass of this meteorite (1 g) and a lack of sufficient data may affect the results.

Among CI-like chondrites, the best match in chemical composition to CI chondrites is found for the Tagish Lake chondrite. Conversely, the Belgica 7904 chondrite, previously considered a member of the potential CY group, unequivocally does not belong to CI or CY group based on its chemical composition.

While potential CY chondrites exhibit significant cadmium depletion, the possibility of coincidental convergence on this matter cannot be excluded. From a mining perspective, parent bodies of CI group carbonaceous chondrites may serve as a potential source of water and, consequently, hydrogen, holding significant importance as potential fuel. Asteroid 1508 Kemi, which is a potential parent body of CI carbonaceous chondrites, may contain about $3.39 \cdot 10^{12}$ Mg of water, including about $3.76 \cdot 10^{11}$ Mg of hydrogen.

Keywords: carbonaceous chondrite, meteorite, CI chondrite, CY chondrite

Wstęp

Chondryty węgliste po raz pierwszy jako osobna klasa zostały wyodrębnione w roku 1863 przez Gustava Rose'a. Następnie Wiik (1956) zaproponował wewnętrzny podział klasy na trzy typy: I, II oraz III, oparty na zawartości składników lotnych (węgiel, woda oraz siarka) i ciężarze właściwym meteorytu. Typy te zostały później przemianowane na C1, C2 oraz C3, a typ C3 wkrótce podzielono dodatkowo na

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa, Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej; e-mail: Konrad.Blutstein@pwr.edu.pl

C3(O) oraz C3(V). Wasson (1985) wprowadził nowe nazwy grup, odpowiednio: CI (Ivuna), CM (Mighei), CO (Ornans) oraz CV (Vigarano). W miarę postępujących badań, dodawano kolejne grupy chondrytów węglistych: CR (Renazzo), CK (Karoonda), CB (Bencubbin), CH (*high iron*) oraz najnowsza, wydzielona w 2021 roku, grupa CL (Loongana) (Grady i in. 2014, Metzler i in. 2021).

Chondryty węgliste grupy CI są jednym z najrzadszych, a jednocześnie najbardziej fascynujących typów meteorytów na Ziemi. Mają one skład pierwiastkowy niemal identyczny do fotosfery słonecznej (z wyłączeniem pierwiastków lotnych: wodoru, helu, litu, węgla, azotu i tlenu) i są uważane za najbardziej pierwotną chemicznie materię meteorytową (Barrat i in. 2012; King i in. 2015). Istnieje możliwość, że to właśnie chondryty CI były głównym źródłem substancji lotnych na Ziemi, w tym wody (Alexander i in. 2012). Warto zaznaczyć, że wszystkie chondryty węgliste grupy CI są brekcjami (Morlok i in. 2006).

Jest to jedyna grupa chondrytów, w której nie występują chondry. Chondryty te zbudowane są niemal całkowicie z matrix (Rubin i Ma 2017; Braukmüller i in. 2018). Inluzy bogate w wapń i glin (CAI – ang. *calcium-aluminium rich inclusions*) występują bardzo rzadko. Chondryty grupy CI zbudowane są z niewielkich ziaren o średnicy poniżej mikrometra i charakteryzują się heterogeniczną strukturą (King i in. 2015).

Potencjalnymi ciałami macierzystymi chondrytów węglistych grupy CI są planetoidy typu B, G (Gaffey i in. 1993), a także potencjalnie typu K (Clark i in. 2009). W badaniach spektroskopowych wśród planetoid typu B, najlepsze dopasowanie do chondrytów grupy CI wykazuje planetoida 1508 Kemi (Cloutis i in. 2011). Różnice w zawartości siarki między chondrytami grupy CI a chondrytami podobnymi do grupy CI (ang. *CI-like*) wskazują, że meteoryty te miały różne ciała macierzyste (King i in. 2015), co sugeruje konieczność rozważenia utworzenia oddzielnej grupy CY (Yamato) (King i in. 2019).

Chondryty węgliste

Aktualnie zidentyfikowano jedynie 9 meteorytów z grupy CI o łącznej masie około 21,5 kg. Żaden z meteorytów nie został odnaleziony w XXI wieku.

Najstarszym meteorytem, którego spadek obserwowano jest chondryt Alais. Spadek nastąpił 15 marca 1806 roku około godziny 17:30 w miejscowościach Saint-Etienne-de-l'Olm oraz Castenau-Valence w pobliżu miasta Alès we Francji, w regionie Langwedocja-Roussillon (obecnie Oksytania). Szacowana masa tego meteorytu to 6 kg (MetBull 2024).

Drugim meteorytem z grupy CI jest Orgueil. Jego spadek obserwowano 14 maja 1864 roku. Meteoryt spadł w pobliżu miejscowości Montauban we Francji, w regionie Midi-Pireneje (obecnie Oksytania). Jego szacowana masa to ok. 14–15 kg (Gounelle i Zolensky 2014).

Trzeci chondryt CI to Tonk. Spadek był obserwowany 22 stycznia 1911 roku w Indiach, w stanie Radżastan. Masa tego meteorytu to 7,7 g (Gounelle i Zolensky 2001; MetBull 2024).

Ivuna jest czwartym chondrytem CI. Od tego właśnie meteorytu swoją nazwę wzięła cała grupa. Meteoryt ten spadł 16 grudnia 1938 roku w brytyjskiej kolonii Tanganika (obecnie Tanzania) w regionie Mbeye, przy jeziorze Rukwa. Masa tego chondrytu to 705 g (Gounelle i Zolensky 2001; King i in. 2020; MetBull 2024).

Piątym i ostatnim meteorystem grupy CI obserwowanym w trakcie spadku jest Revelstoke. Meteoryt ten spadł 31 marca 1967 roku, 64 km od miasta Revelstoke w Kanadzie, w prowincji Kolumbia Brytyjska. Znaleziono tylko 1 g tego meteorytu (Gounelle i Zolensky 2001; MetBull 2024).

Pozostałe cztery meteoryty zostały odnalezione na Antarktydzie w górach Yamato przez poszukiwaczy japońskiego Narodowego Instytutu Badań Polarnych (NIPR – ang. *National Institute of Polar Research*). Pierwsze dwa, Y-86029 oraz Y-86737, znalezione w roku 1986, a ich masy to odpowiednio 11,8 g oraz 2,81 g. Kolejne dwa, Y-980115 oraz Y-980134, odnalezione w roku 1998, a ich masy to odpowiednio 772 g oraz 12,2 g (MetBull 2024).

Podobny skład do chondrytów CI ma również meteoryt Y-82162, jednak oficjalnie sklasyfikowany jest jako C1/2-ung (King i in. 2015; MetBull 2014). Y-980115 również jest przedstawiony w literaturze jako podobny do grupy CI (*CI-like*). Ich skład mineralny różni się od typowych chondrytów CI ze względu na dodatkowe procesy metamorfizmu termicznego, prawdopodobnie spowodowane impaktem lub promieniowaniem słonecznym. W tym drugim przypadku ciałem macierzystym mogła być jedna z planetoid bliskich ziemi, tzw. NEO (ang. *Near-Earth Object*) (King i in. 2015). W roku 2019 King i in. zaproponowali uznanie chondrytów B-7904, Y-86029, Y-82162, Y-86720, Y-86789, Y-980115 jako przedstawicieli osobnej grupy CY. Ich skład chemiczny oraz izotopowy świadczy o możliwości utworzenia się ich ciał macierzystych w innym obszarze dysku protoplanetarnego. Jednym z potencjalnych ciał macierzystych tych chondrytów może być planetoida Ryugu, która była celem japońskiej misji kosmicznej Hayabusa2 (King i in. 2019).

Niektóre publikacje (Grady i in. 2002; Blinova i in. 2014) sugerują istnienie jeszcze jednego chondrytu węglistego grupy CI – Tagish Lake. Mimo oficjalnej klasyfikacji jako C2-ung, oznaczającej chondryt węglisty o typie petrograficznym 2, nieprzypisanym do żadnej grupy, niektórzy badacze sugerują, że powinien być on sklasyfikowany jako chondryt węglisty CI2. W takim przypadku byłby to jedyny chondryt CI o typie petrograficznym innym niż 1 (Grady i in. 2002; Blinova i in. 2014).

Właściwości fizyczne

Znanych jest tylko kilka szczegółowych właściwości fizycznych chondrytów węglistych grupy CI. Badania porowatości matrix opublikowane w 1997 roku wskazują na wartości od 2 do 5% (Corrigan i in. 1997), jednak już rok później, w pracy autorstwa Consolmagno i Britta (1998), opublikowano, że porowatość matrix w meteorycie Orgueil sięga aż 35%. Różnica ta została wyjaśniona jako rezultat kompresji materiału podczas przygotowania próbki do badań w pierwszym przy-

padku (Zolensky i in. 2018). Dla chondrytu Orgueil określono również gęstość ziarna ($2,43 \text{ g/cm}^3$) oraz gęstość objętościową ($1,58 \text{ g/cm}^3$) (Consolmagno i Britt, 1998). Znane są także parametry wytrzymałościowe na rozciąganie dla chondrytów Ivuna (0,7–0,2 MPa) oraz Orgueil (2,8–1,9 MPa) (Tsuchiyama i in. 2009).

Skład chemiczny

Chondryty węgliste grupy CI są silnie utlenione – zawierają magnetyt, nie zawierają metalicznego żelaza. Są też uwodnione – zawierają około 17% masowych wody, głównie związanej w krzemianach warstwowych (Jarosewich 1990). Dla meteorytu Orgueil stwierdzono zawartość wody na poziomie 18,14% masowych, natomiast dla meteorytu Y-980115, uznawanego przez niektórych za przedstawiciela grupy CY, zawartość wody to 11,62% masowych (Zolensky i in. 2018). Charakterystyczna dla chondrytów CI jest także stosunkowo wysoka zawartość składników lotnych, takich jak sód, potas, cynk, siarka i kadm. W porównaniu z innymi grupami meteorytów, planetami i księżycami, chondryty CI wykazują znacznie większą zawartość tych pierwiastków (Braukmüller i in. 2018).

Typowe chondryty CI oraz chondryty podobne do grupy CI różnią się składem izotopowym tlenu. Skład izotopowy tlenu dla typowych chondrytów CI to około 9‰ ^{17}O oraz około 16‰ ^{18}O , podczas gdy w chondrytach podobnych do grupy CI ^{17}O wynosi około 12‰ oraz ^{18}O około 22‰. Ta różnica jest wynikiem procesów metamorfizmu termicznego, które prowadzą do utraty izotopowo lekkiej wody i, w konsekwencji, do wzbogacenia w ciężkie izotopy w ciele stałym (King i in. 2015). Zaobserwowano również mniejsze koncentracje lekkich gazów szlachetnych (He, Ne, Ar) w chondrytach podobnych do grupy CI (CY). Wyższa zawartość Kr i Xe jest rezultatem procesów zachodzących na Ziemi na Antarktydzie (King i in. 2019).

W tabeli 1 przedstawiono obliczony średni skład chemiczny dla całej grupy CI na podstawie danych dla meteorytów powszechnie uznawanych za przedstawicieli tej grupy: Alais, Ivuna, Orgueil, Revelstoke oraz Tonk. Dane te pochodzą z bazy Metbase (Koblitz 2010) uzupełnionej przez autora artykułu o nowsze lub nieuwzględnione w bazie Metbase prace naukowe (Münker i in. 2003; Wolf i in. 2005; Lu i in., 2007; Fischer-Gödde i in. 2010; Barrat i in. 2012; Pourmand i in. 2012; Wang i in. 2014; King i in. 2015, 2020; Braukmüller i in. 2018).

W tabeli 2 przedstawiono średni obliczony skład chemiczny poszczególnych meteorytów powszechnie uznawanych za przedstawicieli grupy CI: Alais, Ivuna, Orgueil, Revelstoke oraz Tonk. Dane te pochodzą z bazy Metbase (Koblitz 2010) uzupełnionej przez autora artykułu o nowsze lub nieuwzględnione w bazie Metbase prace naukowe (Münker i in. 2003; Wolf i in. 2005; Lu i in., 2007; Fischer-Gödde i in. 2010; Barrat i in. 2012; Pourmand i in. 2012; Wang i in. 2014; King i in. 2015, 2020; Braukmüller i in. 2018).

W tabeli 3 przedstawiono średni obliczony skład chemiczny poszczególnych meteorytów uznawanych za podobne do grupy CI (grupa CY): B-7904, Y-82162, Y-86029, Y-86720, Y-86789, Y-980115. Dane pochodzą z bazy Metbase (Koblitz

Tabela 1. Skład chemiczny chondrytów węglistych grupy CI (na podstawie: Münker i in. 2003; Wolf i in. 2005; Lu i in., 2007; Fischer-Gödde i in. 2010; Koblitz 2010; Barrat i in. 2012; Pourmand i in. 2012; Wang i in. 2014; King i in. 2015, 2020; Braukmüller i in. 2018).

Table 1. Chemical composition of carbonaceous chondrites of the CI group (based on: Münker i in. 2003; Wolf i in. 2005; Lu i in., 2007; Fischer-Gödde i in. 2010; Koblitz 2010; Barrat i in. 2012; Pourmand i in. 2012; Wang i in. 2014; King i in. 2015, 2020; Braukmüller i in. 2018).

pierwiastek element	jednostka unit	n	średnia average	mediana median		min	max
H	%	9	2,068	2,090	0,198	1,799	2,420
Li	ppm	5	1,44	1,47	0,18	1,20	1,74
Be	ppb	3	22,6	23,8	2,6	19,0	25,0
B	ppm	7	1,56	1,25	0,90	0,65	3,00
C	%	15	3,40	3,33	0,53	2,70	4,83
N	%	5	0,2913	0,2900	0,0286	0,2400	0,3185
F	ppm	5	63,8	63,0	7,4	54,0	74,0
Na	%	26	0,5910	0,5160	0,3722	0,2523	2,400
Mg	%	27	9,67	9,55	0,82	8,27	12,6
Al	%	29	0,912	0,840	0,303	0,418	2,200
Si	%	17	10,60	10,61	0,73	9,46	13,00
P	%	23	0,100	0,096	0,026	0,048	0,180
S	%	26	4,69	5,33	1,61	0,03	6,70
Cl	ppm	7	653	678	124	510	897
K	ppm	29	602	510	463	312	2990
Ca	%	30	0,870	0,876	0,224	0,154	1,340
Sc	ppm	12	6,1	6,0	0,8	5,0	8,1
Ti	ppm	30	460	440	106	372	1000
V	ppm	18	53	53	5	41	60
Cr	%	32	0,256	0,263	0,048	0,082	0,400
Mn	%	33	0,188	0,187	0,024	0,116	0,250
Fe	%	36	18,8	18,6	1,64	14,4	23,3
Co	ppm	27	502	507	56	332	629
Ni	%	38	1,081	1,085	0,125	0,746	1,560
Cu	ppm	20	132	131	16	106	164
Zn	ppm	34	315	306	41	260	453
Ga	ppm	21	9,9	9,7	1,5	7,2	14,6
Ge	ppm	16	32,9	32,5	4,0	26,4	44,8
As	ppm	14	1,74	1,81	0,24	1,30	2,26
Se	ppm	26	20,4	20,6	2,0	16,5	25,7
Br	ppm	13	3,91	3,58	1,69	2,26	9,01
Rb	ppm	29	2,13	2,20	0,25	1,52	2,51
Sr	ppm	14	7,8	7,8	0,9	6,4	10,6
Y	ppm	13	1,52	1,56	0,17	1,12	1,78
Zr	ppm	25	4,40	3,87	1,44	3,27	9,40

Nb	ppb	16	287	280	37	246	360
Mo	ppm	9	1,33	1,35	0,34	0,93	2,14
Ru	ppb	14	694	672	156	530	1100
Rh	ppb	7	134	133	4	129	143
Pd	ppb	12	544	556	69	330	610
Ag	ppb	15	200	202	18	150	225
Cd	ppb	20	662	677	58	434	711
In	ppb	20	78	80	5	64	88
Sn	ppm	17	1,59	1,68	0,24	1,10	2,01
Sb	ppb	26	163	165	32	118	250
Te	ppm	22	2,75	2,46	1,08	2,16	7,45
I	ppb	3	908	560	584	433	1730
Cs	ppb	24	190	188	27	150	300
Ba	ppm	16	2,82	2,51	0,70	2,12	4,87
La	ppb	20	244	242	25	189	300
Ce	ppb	18	639	621	75	503	860
Pr	ppb	12	96,4	96,1	7,7	82,4	110,0
Nd	ppb	19	476	471	34	415	560
Sm	ppb	23	154	153	12	120	180
Eu	ppb	24	57,5	57,5	5,1	48,5	74,0
Gd	ppb	16	208	207	16	180	250
Tb	ppb	12	36,99	37,55	2,34	31,0	40,15
Dy	ppb	17	249	252	22	200	300
Ho	ppb	7	58	58	4	53	65
Er	ppb	15	167	166	10	150	189
Tm	ppb	9	25,83	26,20	1,66	22,00	27,95
Yb	ppb	24	169	167	12	140	200
Lu	ppb	17	26	25	2	23	34
Hf	ppb	20	138	116	62	96	340
Ta	ppb	3	15	15	0,5	14	15
W	ppb	14	112	106	31	78	200
Re	ppb	29	38	38	6	25	55
Os	ppb	25	497	484	96	340	900
Ir	ppb	29	459	456	46	380	630
Pt	ppb	18	957	925	179	600	1370
Au	ppb	26	140,5	140,0	32,6	86,2	250,0
Hg	ppm	6	10,141	10,300	7,930	0,258	20,200
Tl	ppb	20	128	137	29	63	169
Pb	ppm	14	2,41	2,56	0,56	0,55	2,86
Bi	ppb	10	120	112	23	106	188
Th	ppb	12	32,4	29,5	7,2	25,1	52,9
U	ppb	16	11	8	6	6	32

Tabela 2. Średni skład chemiczny poszczególnych chondrytów węglistych grupy CI (na podstawie: Münker i in. 2003; Wolf i in. 2005; Lu i in., 2007; Fischer-Gödde i in. 2010; Koblitz 2010; Barrat i in. 2012; Pourmand i in. 2012; Wang i in. 2014; King i in. 2015, 2020; Braukmüller i in. 2018).

Table 2. Average chemical composition of selected carbonaceous chondrites of the CI group (based on: Münker i in. 2003; Wolf i in. 2005; Lu i in., 2007; Fischer-Gödde i in. 2010; Koblitz 2010; Barrat i in. 2012; Pourmand i in. 2012; Wang i in. 2014; King i in. 2015, 2020; Braukmüller i in. 2018).

El.	unit	Alais		Ivuna		Orgueil		Revelstoke		Tonk	
		n	Average	n	Average	n	Average	n	Average	n	Average
H	%	2	2,180	1	2,090	5	1,948			1	2,420
Li	ppm			1	1,47	4	1,43				
Be	ppb			1	23,8	2	22,0				
B	ppm			3	2,15	4	1,12				
C	%	3	3,19	2	4,09	8	3,32	1	4,00	1	2,70
N	%	2	0,2900			3	0,2922				
F	ppm			2	66,5	3	62,0				
Na	%	4	0,5202	5	0,5300	15	0,5112			2	1,4830
Mg	%	4	10,22	4	9,64	17	9,49	1	12,00	1	8,27
Al	%	5	1,071	5	0,823	17	0,808	1	2,20	1	1,016
Si	%	2	9,71	2	10,66	11	10,54	1	13,00	1	10,48
P	%	2	0,119	6	0,100	14	0,101			1	0,048
S	%	4	4,74	6	5,10	14	4,36	1	5,40	1	5,88
Cl	ppm	1	897	1	698	4	616			1	510
K	ppm	4	519	6	476	16	514	1	800	2	1750
Ca	%	4	0,739	4	1,032	19	0,848	1	1,100	2	0,905
Sc	ppm	2	6,9	2	5,3	7	6,1			1	6,0
Ti	ppm	3	462	7	431	18	437	1	1000	1	540
V	ppm	2	47	4	53	12	54				
Cr	%	5	0,236	6	0,246	18	0,271	1	0,320	2	0,176
Mn	%	5	0,194	6	0,191	19	0,188	1	0,250	2	0,128
Fe	%	4	17,0	7	19,1	21	18,9	1	22,0	2	18,1
Co	ppm	4	522	6	492	15	505	1	600	1	332
Ni	%	5	1,155	8	1,104	22	1,073	1	1,300	2	0,771
Cu	ppm	2	147	6	128	11	132			1	130
Zn	ppm	4	339	8	301	21	318			1	280
Ga	ppm	2	11,4	5	8,7	13	10,1			1	10,3
Ge	ppm	4	35,9	3	31,6	9	32,0				
As	ppm	1	1,82	3	1,60	9	1,76			1	1,95
Se	ppm	4	21,7	6	20,2	15	20,0			1	21,2
Br	ppm	2	2,33	3	4,64	7	3,32			1	9,01
Rb	ppm	2	1,55	9	2,12	18	2,20				
Sr	ppm			5	7,6	9	7,8				
Y	ppm			3	1,45	10	1,55				
Zr	ppm			7	4,27	18	4,44				

Nb	ppb			5	282	11	289				
Mo	ppm			3	1,18	5	1,39			1	1,50
Ru	ppb	2	621	2	635	9	696			1	940
Rh	ppb			3	134	4	134				
Pd	ppb	2	444	2	564	8	564				
Ag	ppb	1	204	5	191	9	204				
Cd	ppb	3	583	5	680	12	674				
In	ppb	2	84	5	78	13	77				
Sn	ppm	1	1,80	5	1,74	11	1,51				
Sb	ppb	3	191	6	172	16	157			1	120
Te	ppm	2	2,88	4	2,50	16	2,79				
I	ppb			1	1730	2	496				
Cs	ppb	2	181	8	190	14	191				
Ba	ppm			6	2,65	10	2,93				
La	ppb	1	233	6	240	12	248			1	220
Ce	ppb	1	579	7	629	10	651				
Pr	ppb			5	94,1	7	98,0				
Nd	ppb	1	489	7	465	11	481				
Sm	ppb	1	148	7	156	14	154			1	150
Eu	ppb	2	55,4	7	57,8	14	58,0			1	53,0
Gd	ppb			6	206	10	210				
Tb	ppb	1	36,90	5	36,63	6	37,30				
Dy	ppb			6	251	10	253			1	200
Ho	ppb			2	58	5	58				
Er	ppb			6	162	9	169				
Tm	ppb			4	26,24	5	25,50				
Yb	ppb	2	171	7	168	14	170			1	160
Lu	ppb	2	24	5	25	9	26			1	24
Hf	ppb			6	144	13	136			1	120
Ta	ppb			1	15	2	14				
W	ppb			4	107	10	115				
Re	ppb	2	33	7	36	19	39			1	55
Os	ppb	3	431	5	494	16	510			1	500
Ir	ppb	4	444	6	447	18	466			1	461
Pt	ppb	1	600	5	1008	11	945			1	1200
Au	ppb	4	101,0	5	141,2	16	153,6			1	86,2
Hg	ppm			1	0,790	4	10,264			1	19,000
Tl	ppb	2	140	6	124	12	126				
Pb	ppm			5	2,63	9	2,28				
Bi	ppb	1	188	2	109	7	114				
Th	ppb			4	27,8	8	34,6				
U	ppb	1	8,9	5	7,7	10	12,3				

Tabela 3. Średni skład chemiczny wybranych chondrytów węglistych podobnych do grupy CI (ang. CI-like) (na podstawie: Brown i in. 2000; Friedrich i in. 2002; Koblitz 2010; Blinova i in. 2014; King i in. 2015; Braukmüller i in. 2018).

Table 3. Average chemical composition of selected carbonaceous chondrites similar to the CI group (CI-like) (na podstawie: Brown i in. 2000; Friedrich i in. 2002; Koblitz 2010; Blinova i in. 2014; King i in. 2015; Braukmüller i in. 2018).

El.	unit	CI		B-7904		Tagish Lake		Y-82162		Y-86029		Y-86720		Y-86789		Y-980115	
		Average	n	Average	n	Average	n	Average	n	Average	n	Average	n	Average	n	Average	n
H	%	2,068	2	0,292			1	1,340				1	0,720				
Li	ppm	1,44			10	1,51											
Be	ppb	22,6			9	48,1											
C	%	3,40	4	1,01	2	4,00											
N	%	0,2913	2	0,0545													
F	ppm	63,8			1	50,0											
Na	%	0,5910	3	0,4683	11	0,3109	3	0,5167				3	0,3333	1	0,2700	1	0,5768
Mg	%	9,67	3	14,33	11	10,81	4	11,44				4	13,33	1	12,70	1	10,59
Al	%	0,912	3	1,437	15	0,939	3	1,032				3	1,365	1	1,037	1	0,907
Si	%	10,60	2	14,85	5	12,00	1	12,62				1	14,20	1	13,71		
P	%	0,100	2	0,146	6	0,094	1	0,157				1	0,096			1	0,111
S	%	4,69	3	4,58	3	3,76	1	7,32				1	4,82	1	2,41	1	6,20
Cl	ppm	653			1	557											
K	ppm	602	2	374	11	384	2	858				2	426			1	608
Ca	%	0,870	3	1,307	11	0,829	4	1,185				4	1,295	1	1,620	1	1,013
Sc	ppm	6,1			11	7,8											
Ti	ppm	460	3	743	15	522	3	733				3	532	1	480	1	458
V	ppm	53	1	70	20	58	2	50				2	64			1	56
Cr	%	0,256	2	0,342	15	0,270	1	0,328				1	0,294	1	0,287	1	0,300
Mn	%	0,188	3	0,180	20	0,152	3	0,216				3	0,164	1	0,209	1	0,206
Fe	%	18,8	2	24,2	11	18,8	3	25,2				2	24,2	1	19,0	2	24,1

Co	ppm	502	3	521	20	504	2	440	1	516	2	482	1	380	1	591
Ni	%	1,081	2	1,280	11	1,002	1	1,006			1	1,190	1	0,707	1	1,256
Cu	ppm	132			15	110									1	151
Zn	ppm	315	1	171	24	216	1	364	1	340	1	29	1	31	1	391
Ga	ppm	9,9	1	9,3	12	8,0	1	13,2	1	12,1	1	9,7	1	7,5	1	9,8
Ge	ppm	32,9			5	22,6										
As	ppm	1,74			16	1,66									1	1,96
Se	ppm	20,4	1	14,7	24	13,4	1	27,8	1	24,9	1	20,1	1	17,6		
Br	ppm	3,91			7	2,32										
Rb	ppm	2,13	1	1,90	13	1,68	2	3,01	1	1,69	2	1,71	1	1,93	1	2,64
Sr	ppm	7,8			10	8,3	1	8,2			1	11,8				
Y	ppm	1,52			10	1,86										
Zr	ppm	4,40			11	5,84									1	3,87
Nb	ppb	287			11	404									1	308
Mo	ppm	1,33			14	1,03										
Ru	ppb	694			16	910										
Rh	ppb	134			1	152									1	146
Pd	ppb	544			16	600										
Ag	ppb	200	1	148	10	155	1	291	1	294	1	128	1	151	1	290
Cd	ppb	662	1	2	10	503			1	115	1	1	1	3	1	13
In	ppb	78	1	35	4	62	1	39	1	22	1	16	1	12	1	25
Sn	ppm	1,59			11	0,99									1	1,72
Sb	ppb	163	1	120	17	178	1	140	1	120	1	72	1	88		
Te	ppm	2,75	1	1,61	13	1,57	1	3,12	1	2,44	1	1,68	1	1,79	1	2,99
I	ppb	908			1	1390										
Cs	ppb	190	1	140	14	139	1	211	1	201	1	143	1	176	1	205
Ba	ppm	2,82			15	3,75	1	2,80			1	3,77			1	2,58

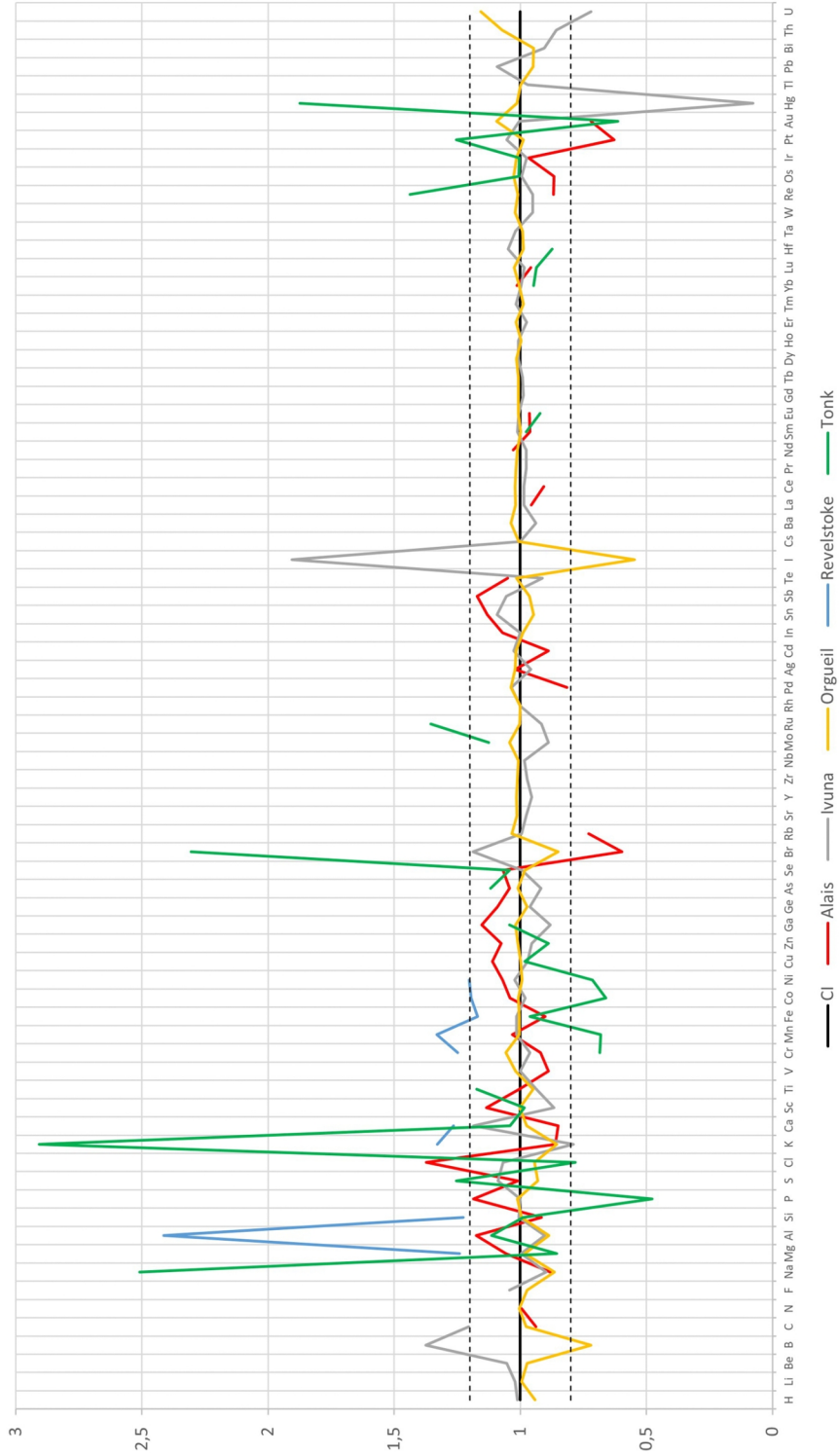
La	ppb	244	2	385	16	327	3	263			3	439		1	230
Ce	ppb	639			11	826	1	701			1	943		1	616
Pr	ppb	96,4			11	120,6								1	99,3
Nd	ppb	476			11	584	1	531			1	717		1	508
Sm	ppb	154	2	270	16	186	3	194			3	248		1	167
Eu	ppb	57,5			12	70,0	1	67,0			1	97,0		1	62,9
Gd	ppb	208			11	253	1	235			1	315		1	257
Tb	ppb	36,99			12	47,54								1	41,70
Dy	ppb	249			11	280	1	298			1	397		1	280
Ho	ppb	58			10	64									
Er	ppb	167			11	194	1	197			1	257		1	183
Tm	ppb	25,83			11	31,69								1	28,10
Yb	ppb	169	2	170	12	198	3	140			3	219		1	191
Lu	ppb	26			12	33	1	31			1	41		1	28
Hf	ppb	138			12	183								1	114
Ta	ppb	15			5	360									
W	ppb	112			9	276								1	108
Re	ppb	38			17	42								1	39
Os	ppb	497			11	316									
Ir	ppb	459	2	555	22	478	2	530			2	560		1	405
Pt	ppb	957			17	963								1	973
Au	ppb	140,5	3	163	10	176	3	86	1	357	3	180	1	163	
Tl	ppb	128	1	6	7	98	1	3	1	13	1	7	1	6	7
Pb	ppm	2,41			10	10,00								1	2,78
Bi	ppb	120	1	18	3	85	1	23	1	2	1	4	1	11	
Th	ppb	32,4			11	82,6								1	29,5
U	ppb	11	1	13	11	12	1	12			1	11	1	18	7

2010) uzupełnionej przez autora artykułu o nowsze lub nieuwzględnione w bazie Metbase prace naukowe (Brown i in. 2000; Friedrich i in. 2002; Blinova i in. 2014; King i in. 2015; Braukmüller i in. 2018).

Na rysunku 1 przedstawiono skład chemiczny powszechnie uznanych chondrytów CI w stosunku do średniego składu chemicznego grupy CI określonego przez autora w tej publikacji. Linia przerywaną zaznaczono wartości 0,8 oraz 1,2, wyznaczające obszar „typowego” składu chemicznego grupy CI. Warto zauważyć, że niektóre zawartości pierwiastków nie mieszczą się w tym zakresie dla niektórych meteorytów. Meteoryty Alais, Ivuna oraz Orgueil dość dobrze wpasowują się w średni skład chemiczny grupy CI, jednak dane dla meteorytu Revelstoke niemal w całości znajdują się poza obszarem typowego składu, a meteoryt Tonk wykazuje zubożenie w fosfor oraz wzbogacenie w sód, potas, brom oraz rtęć. Różnice te mogą wynikać z niedostatecznej ilości danych lub błędów pomiarowych, co związane jest z małą masą tych meteorytów.

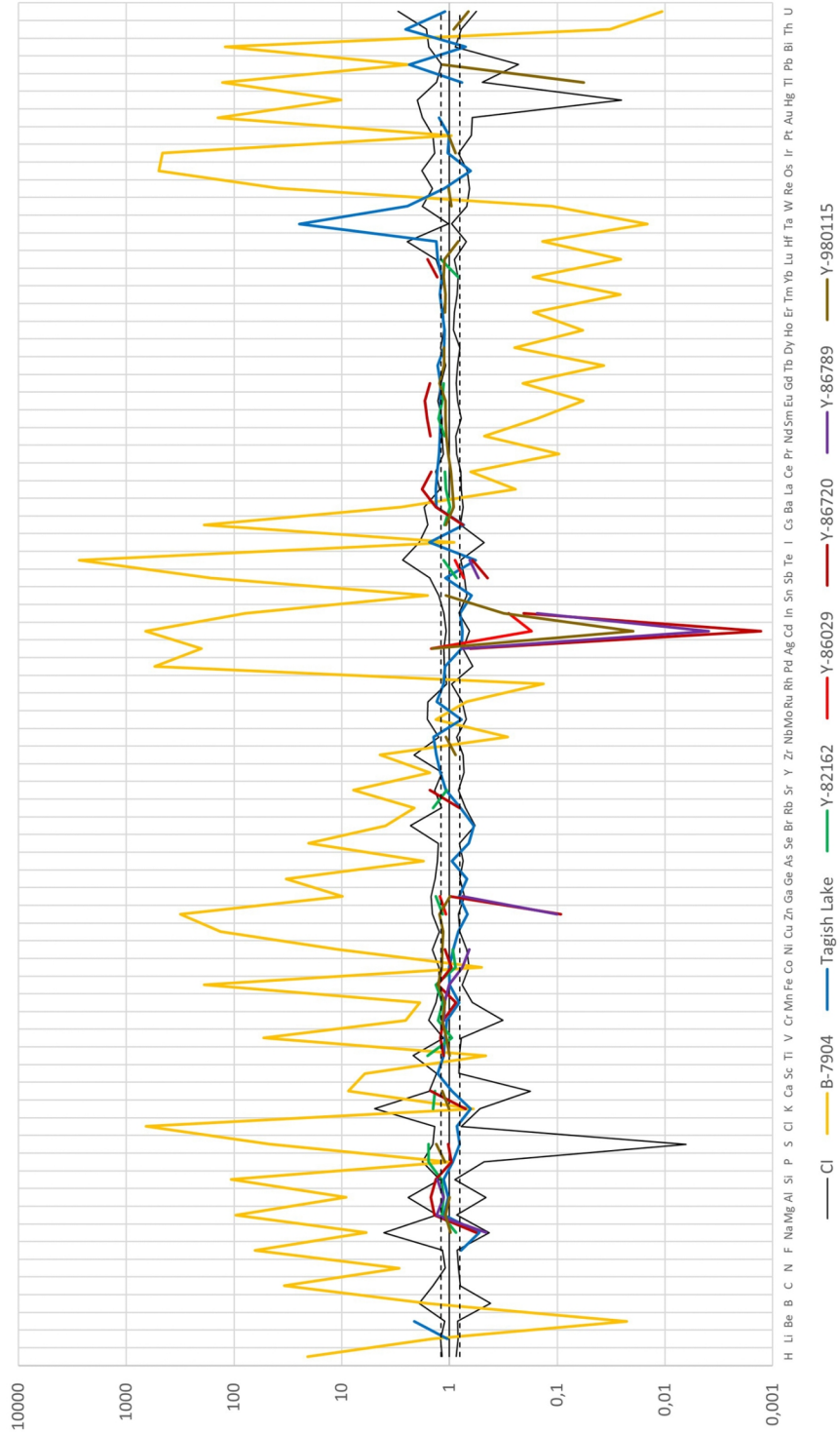
Na rysunku 2 przedstawiono skład chemiczny chondrytów potencjalnej grupy CY w stosunku do średniego składu chemicznego grupy CI określonego w tej publikacji. Linia przerywaną zaznaczono wartości 0,8 oraz 1,2, wyznaczającą obszar „typowego” składu chemicznego grupy CI. Wartości te zostały przyjęte przez autora z uwagi na wykorzystane dane literaturowe, w których różnice w wynikach pomiarów wynikać mogą z masy analizowanych próbek, wykorzystanej metody czy też zmian w składzie chemicznym próbek wynikających z procesów ziemskiego wietrzenia. Cienką czarną linią wyznaczono granice przebiegu minimalnych i maksymalnych wartości wyznaczonych dla meteorytów powszechnie uznawanych za CI. Wykres jednoznacznie pokazuje, że meteoryt B-7904 nie charakteryzuje się składem typowym dla chondrytów grupy CI, ani potencjalnej grupy CY. Obserwuje się znaczne zubożenie tego meteorytu w pierwiastki ziem rzadkich oraz wzbogacenie w pozostałe pierwiastki, w tym wodór, co może wskazywać na znaczną zawartość wody w chondrycie B-7904.

Na rysunku 3 przedstawiono skład chemiczny chondrytów potencjalnej grupy CY z wyłączeniem chondrytu B-7904 w stosunku do średniego składu chemicznego grupy CI określonego w tej publikacji. Linia przerywaną zaznaczono wartości 0,8 oraz 1,2, wyznaczającą obszar „typowego” składu chemicznego grupy CI. Cienką czarną linią wyznaczono granice przebiegu minimalnych i maksymalnych wartości wyznaczonych dla meteorytów powszechnie uznawanych za CI. Dane w większości mieszczą się w zakresie typowym dla grupy CI lub w zakresie znanych wyników dla tej grupy. Meteoryt Tagish Lake od grupy CI różni się przede wszystkim znacznym wzbogaceniem w Ta oraz wyższą niż w grupie CI zawartością Be, Pb oraz Th. Od chondrytów potencjalnej grupy CY różni się również brakiem znacznego zubożenia w kadm. Jeżeli uznać chondryty Y-82162, Y-86029, Y-86720, Y-86789 oraz Y-980115 za należące do jednej grupy CY, pod względem składu chemicznego zubożenie w kadm wydaje się najbardziej charakterystyczną cechą. Dla chondrytów Y-86720 oraz Y-86789 zauważalne jest znaczne zubożenie w Zn, zaś chondrytu Y-980115 znaczne zubożenie w Tl. Ze względu na ograniczoną liczbę danych, trudno jednoznacznie ocenić wiarygodność tych wyników.



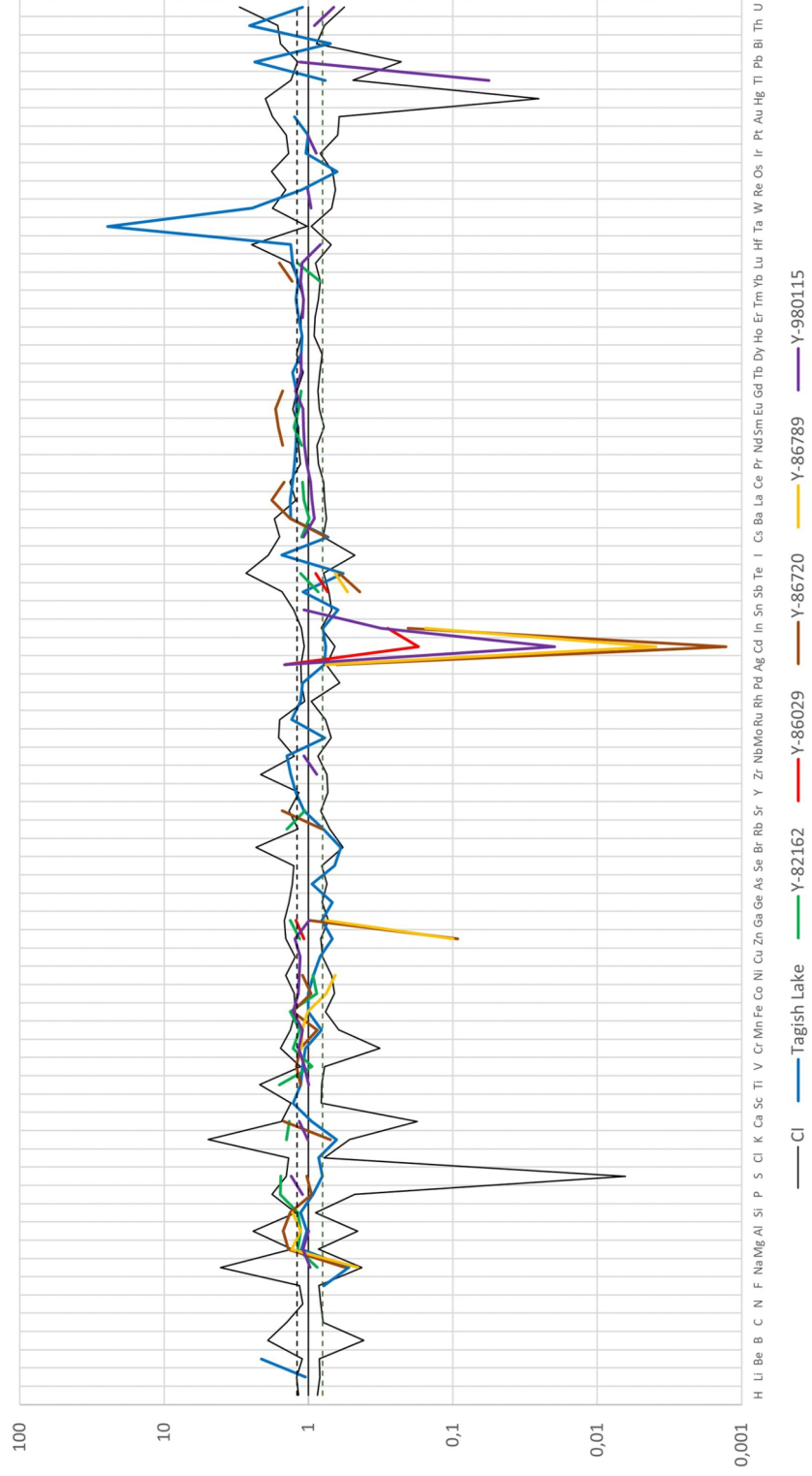
Rys. 1. Średni skład chemiczny wybranych chondrytów węglistych CI w stosunku do średniego składu chemicznego grupy CI określonego przez autora w tej publikacji.

Fig. 1. Average chemical composition of selected CI carbonaceous chondrites in relation to the average chemical composition of the CI group determined by author in this publication.



Rys. 2. Średni skład chemiczny wybranych chondrytów węglistych podobnych do CI w stosunku do średniego składu chemicznego grupy CI określonego przez autora w tej publikacji.

Fig. 2. Average chemical composition of selected CI-like carbonaceous chondrites relative to the average chemical composition of the CI group determined by author in this publication.



Rys. 3. Średni skład chemiczny wybranych chondrytów węglistych podobnych do CI (bez B-7904) w stosunku do średniego składu chemicznego grupy CI określonego przez autora w tej publikacji.

Fig. 3. Average chemical composition of selected CI-like carbonaceous chondrites (excluding B-7904) relative to the average chemical composition of the CI group determined by author in this publication.

Skład mineralny

Skład jakościowy głównych minerałów chondrytów CI jest zbliżony do składu całej grupy chondrytów węglistych, przede wszystkim chondrytów grup CM oraz CR z uwagi na obecność wody. Skład ilościowy minerałów odróżnia grupę CI od pozostałych chondrytów węglistych (Rubin i Ma 2017).

Na ciałach macierzystych chondrytów węglistych grupy CI zachodziły procesy związane z obecnością wody. Dla grupy tej zmiany te zachodziły przy temperaturze od 0 do 150°C. Woda w chondrytach CI występuje przede wszystkim w minerałach grupy serpentynu oraz w saponicie, które budują matrix i stanowią około 95% objętości chondrytów CI. Ponadto w chondrytach CI można zaobserwować uwodnione minerały takie jak: gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), błodyt ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), nikielbłodyt ($\text{Na}_2(\text{Ni},\text{Mg})(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) (Rubin i Ma 2017) oraz powstałe w wyniku procesów związanych z wodą minerały bezwodne: magnetyt (Fe_3O_4), pirotyt (Fe_{1-x}S), pentlandyt ($(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$), kubanit (CuFe_2S_3), kalcyt (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), breunneryt ($(\text{Mg},\text{Fe})\text{CO}_3$) oraz syderyt (FeCO_3) (Rubin i Ma 2017). Skład siarczków różni się dla poszczególnych przedstawicieli grupy CI (Berger i in. 2016). W chondrytach węglistych CI można ponadto zaobserwować takie minerały jak: oliwin (Fa_{0-42}), niskowapniowe pirokseny oraz diopsyd ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$). Obserwowane były również presolarne ziarna grafitu (C), diamentu (C), węgla krzemu (SiC) oraz korundu (Al_2O_3). Inne minerały tlenkowe to magnesiokromit (MgCr_2O_4), eskolait (Cr_2O_3), magnezyt bogaty w żelazo ($(\text{Mg},\text{Fe})\text{CO}_3$) oraz wateryt (CaCO_3). Ponadto rzadkie ziarna spinelu (MgAl_2O_4) oraz hibonitu ($\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$).

Okolo połowa chondrytów węglistych grupy CI (potencjalna grupa CY) była poddana metamorfizmowi termicznemu. Przykładem takiego chondrytu jest Y-86029, w którym nie występują krzemiany warstwowe. W skale występują kryształy oliwinu ($(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$), magnetytu oraz troilitu (FeS). W wyniku metamorfizmu węglany bogate w magnez oraz żelazo zostały rozbite na tlenki wapnia, magnezu, żelaza oraz manganu, siarczki natomiast na ziarna magnetytu z siarczkowymi inkluzjami (Tonui i in 2014; Rubin i Ma 2017).

W meteorycie Orgueil zaobserwowano aglutynaty z wysuszonymi krzemianami warstwowymi oraz stopione szkliwo częściowo zdewitryfikowane do oliwinu. Są to dowody wystąpienia metamorfizmu szokowego (Rubin i Ma 2017).

W chondrytach CI zaobserwowano również minerały, które swoją genezę mają w procesach wietrzenia na Ziemi: epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), błodyt, gips oraz siarczany żelaza, magnezu, sodu oraz wapnia (Rubin i Ma 2017).

Zawartość objętościowa minerałów dla grupy CI to: 81–84% serpentynów/saponitu, 6–10% magnetytu, 4–7% siarczków, <3% węglanów. Dla potencjalnej grupy CY, w przypadku chondrytu Y-980115 jest to odpowiednio 71% krzemianów, 19% siarczków, 8% oliwinu, 2% magnetytu. Podobny skład wykazuje chondryt Y-82162 (68% krzemianów, 19% siarczków, 11% oliwinu, 2% magnetytu). Chondryty te były poddane metamorfizmowi termicznemu w temperaturze powyżej 500°C. Obiekty te pochodzą prawdopodobnie z innego ciała macierzystego (King i in. 2015).

Podsumowanie i wnioski

Chociaż grupa CI chondrytów węglistych ma stosunkowo niewielu przedstawicieli, istnieje uzasadniona wątpliwość, czy ich część nie powinna stanowić oddzielnej grupy chondrytów węglistych, o sugerowanej w literaturze nazwie CY (Yamato). Wynika to z różnic w ich składzie mineralnym, chemicznym oraz izotopowym, które chociaż niewielkie, są wyraźne i wewnętrznie spójne w obrębie grupy CI oraz potencjalnej CY. Różnice te wskazują na potencjalnie oddzielne ciała macierzyste chondrytów CI oraz CY. Za przedstawicieli chondrytów grupy CY należałoby uznać meteoryty: Y-82162 (C1/2-ung), Y-86029 (CI1), Y-86720 (C2-ung), Y-86789 (C2-ung) oraz Y-980115 (CI1). Sugerowany jako CY przez Kinga i in. (2019) chondryt B-7904 (C2-ung) z całą pewnością nie należy do tej potencjalnej grupy z uwagi na zbyt duże różnice w składzie pierwiastkowym, w tym wyraźne zubożenie w pierwiastki ziem rzadkich w stosunku do innych chondrytów CI oraz CY.

Otwartą kwestią pozostaje klasyfikacja meteorytu Tagish Lake (C2-ung). Skład chemiczny jest mocno zbliżony do grupy CI, co może sugerować, że pochodzi on z tego samego ciała macierzystego, lub powstałego w tym samym rejonie dysku protoplanetarnego. Kwestią kontrowersyjną jest przede wszystkim typ petrograficzny 2. Przyjęło się, że chondryty grupy CI, jako materia o najbardziej pierwotnym składzie, a jednocześnie silnie przeobrażona pod wpływem wody, występuje tylko w typie petrograficznym 1. Z tego powodu Tagish Lake jest jednym z ciekawszych meteorytów, być może jedynym znanym obecnie przedstawicielem zupełnie innej grupy chondrytów węglistych.

W kontekście potencjalnych surowców naturalnych występujących w ciałach macierzystych chondrytów węglistych grupy CI, planetoidy te nie będą z pewnością obiektem zainteresowania pozaziemskiego górnictwa metali, z uwagi na brak znacznego wzbogacenia w minerały rudne ani w metale w ogóle (Blutstein i in. 2022). Mogą być za to źródłem pozyskiwania wody poza Ziemią. Średnia zawartość wody wynosi około 17% masowych (Jarosewich 1990). Przy założeniu, że ciałem macierzystym jest planetoida 1508 Kemi (Cloutis i in. 2011) o średnicy około 16 km (Alí-Lagoa i Delbo 2017), przy gęstości objętościowej ($1,58 \text{ g/cm}^3$) (Consolmagno i Britt, 1998) masa wody zgromadzonej w tej planetoidzie wynosiłaby około $3,39 \cdot 10^{12}$ Mg. Zatem masa wodoru wynosiłaby wówczas około $3,76 \cdot 10^{11}$ Mg. Ciała macierzyste chondrytów potencjalnej grupy CY, z uwagi na podobny skład chemiczny i mineralny jak grupa CI, a także niższą zawartość wody (11,62% masowych – Zolensky i in. 2018) nie wydają się być interesujące pod względem potencjalnej eksploatacji surowców.

Podziękowania

Pragnę wyrazić podziękowania Recenzentom: Panu Profesorowi Tadeuszowi Przylibskiemu oraz Pani Doktor Agacie Krześcińskiej za cenne sugestie uzupełnień tekstu i wprowadzenia korekt i poprawek, oraz za szybkie wykonanie recenzji, dzięki czemu artykuł mógł zostać opublikowany jeszcze w tym numerze.

Streszczenie

Chondryty węgliste z grupy CI stanowią najbardziej pierwotną materię w Układzie Słonecznym dostępną do badań. Obecnie tylko 9 meteorytów zostało sklasyfikowanych jako chondryty węgliste grupy CI, z czego dla dwóch z nich klasyfikacja ta jest kwestionowana. W literaturze sugeruje się, aby te dwa meteoryty, wraz z innymi podobnymi, uznać za osobną grupę CY. Dodatkowo, meteoryt Tagish Lake jest rozważany jako CI2, chociaż ta klasyfikacja nie zdobyła powszechnej akceptacji.

Na podstawie ograniczonej ilości źródeł literaturowych dotyczących składu pierwiastkowego chondrytów grupy CI oraz chondrytów podobnych do CI, stwierdzono, że chondryty Alais, Ivuna oraz Orgueil mają najbardziej zbliżony skład pierwiastkowy. Skład chondrytu Tonk różni się nieznacznie, ale wciąż mieści się w zakresie typowym dla chondrytów grupy CI. Skład chemiczny meteorytu Revelstoke znacząco odbiega od średniego składu chondrytów grupy CI, jednak niewielka masa tego meteorytu (1 g) i brak dostatecznej ilości danych mogą wpływać na wyniki.

Śród chondrytów podobnych do CI, najlepsze dopasowanie składu chemicznego do grupy CI wykazuje chondryt Tagish Lake. Natomiast najgorsze dopasowanie charakteryzuje chondryt Belgica 7904, uważany za członka potencjalnej grupy CY, jednak na podstawie składu chemicznego jednoznacznie można stwierdzić, że nie należy do grupy CI lub CY.

Chociaż potencjalne chondryty CY wykazują znaczne zubożenie w kadm, nie można wykluczyć przypadkowej zbieżności w tej kwestii. Z perspektywy górniczej, ciała macierzyste chondrytów węglistych grupy CI mogą stanowić potencjalne źródło wody, a co za tym idzie, również wodoru, mającego istotne znaczenie jako potencjalne paliwo. Planetoidea 1508 Kemi będąca potencjalnym ciałem macierzystym chondrytów węglistych grupy CI może zawierać około $3,39 \cdot 10^{12}$ Mg wody, w tym około $3,76 \cdot 10^{11}$ Mg wodoru.

Słowa kluczowe: chondryt węglisty, meteoryt, chondryt CI, chondryt CY

Literatura

- Alexander C.M.O'D., Bowden R., Fogel M.L., Howard K.T., Herd C.D.K., Nittler L.R., 2012, *The Provenances of Asteroids, and Their Contributions to the Volatile Inventories of the Terrestrial Planets*, Science, 337(6095), s. 721–723. doi:10.1126/science.1223474
- Alí-Lagoa V., Delbo M., 2017, *Sizes and albedos of Mars-crossing asteroids from WISE/NEO-WISE data*, Astronomy & Astrophysics, 603, A55. doi:10.1051/0004-6361/201629917
- Barrat J.A., Zanda B., Moynier F., Bollinger C., Liorzou C., Bayon G., 2012, *Geochemistry of CI chondrites: Major and trace elements, and Cu and Zn Isotopes*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 83, s. 79–92. doi:10.1016/j.gca.2011.12.011
- Berger E., Lauretta D.S., Zega T.J., Keller L.P., 2016, *Heterogeneous histories of Ni-bearing pyrrhotite and pentlandite grains in the CI chondrites Orgueil and Alais*, Meteoritics & Planetary Science, 51(10), s. 1813–1829. doi:10.1111/maps.12721
- Blinova A.I., Herd C.D.K., Duke M.J.M., 2014, *Testing variations within the Tagish Lake meteorite—II: Whole-rock geochemistry of pristine samples*, Meteoritics & Planetary Science, 49(6), s. 1100–1118. doi:10.1111/maps.12303
- Blutstein K., Przylibski T.A., Łuszczek K., Gruchot J., 2022, *Skład chondrytów węglistych jako wyznacznik zasobności planetoid typu C w surowce metaliczne*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 13, s. 7–26.
- Braukmüller N., Wombacher F., Hezel D.C., Escoube R., Münker C., 2018, *The chemical composition of carbonaceous chondrites: Implications for volatile element depletion, complementarity and alteration*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 239, s. 17–48. doi:10.1016/j.gca.2018.07.023

- Brown P.G., Hildebrand A.R., Zolensky M.E., Grady M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Tagliaferri E., Spalding R., Macrae N.D., Hoffman E.L., Mittlefehldt D.W., Wacker J.F., Bird J.A., Campbell M.D., Carpenter R., Gingerich H., Glatiotis M., Greiner E., Mazur M.J., McCausland P.J., Plotkin H., Mazur T.R., 2000, *The Fall, Recovery, Orbit, and Composition of the Tagish Lake Meteorite: A New Type of Carbonaceous Chondrite*, Science, 290(5490), s. 320-325. doi:10.1126/science.290.5490.320
- Clark B.E., Ockert-Bell M.E., Cloutis E.A., Nesvorny D., Mothé-Diniz T., Bus S.J., 2009, *Spectroscopy of K-complex asteroids: Parent bodies of carbonaceous meteorites?*, Icarus, 202(1), s. 119–133. doi:10.1016/j.icarus.2009.02.027
- Cloutis E.A., Hiroi T., Gaffey M.J., Alexander C.M.O'D., Mann P., 2011, *Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 1. CI chondrites*, Icarus, 212(1), s. 180–209. doi:10.1016/j.icarus.2010.12.009
- Consolmagno G.J., Britt D.T., 1998, *The density and porosity of meteorites from the Vatican collection*, Meteoritics & Planetary Science, 33(6), s. 1231–1241. doi:10.1111/j.1945-5100.1998.tb01308.x
- Corrigan C.M., Zolensky M.E., Dahl J., Long M., Weir J., Sapp C., Burkett P.J., 1997, *The porosity and permeability of chondritic meteorites and interplanetary dust particles*, Meteoritics & Planetary Science, 32(4), s. 509–515. doi:10.1111/j.1945-5100.1997.tb01296.x
- Fischer-Gödde M., Becker H., Wombacher F., 2010, *Rhodium, gold and other highly siderophile element abundances in chondritic meteorites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 74(1), s. 356-379. doi:10.1016/j.gca.2009.09.024
- Friedrich J.M., Wang M.-S., Lipschutz M.E., 2002, *Comparison of the trace element composition of Tagish Lake with other primitive carbonaceous chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 37(5), s. 677-686. doi:10.1111/j.1945-5100.2002.tb00847.x
- Gaffey M.J., Burbine T.H., Binzel R.P., 1993, *Asteroid spectroscopy: Progress and perspectives*, Meteoritics, 28(2), s. 161-187. doi:10.1111/j.1945-5100.1993.tb00755.x
- Gounelle M., Zolensky M.E., 2014, *A terrestrial origin for sulfate veins in CII chondrites*, Meteoritics & Planetary Science, 36(10), s. 1321–1329. doi:10.1111/j.1945-5100.2001.tb01827.x
- Gounelle M., Zolensky M.E., 2014, *The Orgueil meteorite: 150 years of history*, Meteoritics & Planetary Science, 49(10), s. 1769–1794. doi:10.1111/maps.12351
- Grady M.M., Verchovsky A.B., Franchi I.A., Wright I.P., Pillinger C.T., 2002, *Light element geochemistry of the Tagish Lake C12 chondrite: Comparison with CII and CM2 meteorites*, Meteoritics & Planetary Science, 37(5), s. 713–735. doi:10.1111/j.1945-5100.2002.tb00851.x
- Grady M.M., Pratesi G., Moggi Cecchi V., 2014, *Atlas of meteorites*, Cambridge University Press, Cambridge
- Jarosewich E., 1990, *Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses*, Meteoritics, 25(4), s. 323-337. doi:10.1111/j.1945-5100.1990.tb00717.x
- King A.J., Schofield P.F., Howard K.T., Russell S.S., 2015, *Modal mineralogy of CI and CI-like chondrites by X-ray diffraction*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 165, s. 148–160. doi:10.1016/j.gca.2015.05.038
- King A.J., Bates H.C., Krietsch D., Busemann H., Clay P.L., Schofield P.F., Russell S.S., 2019, *The Yamato-type (CY) carbonaceous chondrite group: Analogues for the surface of asteroid Ryugu?*, Geochemistry, 79(4), s. 125531. doi:10.1016/j.chemer.2019.08.003
- King A.J., Phillips K.J.H., Strekopytov S., Vita-Finzi C., Russell S.S., 2020, *Terrestrial modification of the Ivuna meteorite and a reassessment of the chemical composition of the CI type specimen*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 268, s. 73–89. doi:10.1016/j.gca.2019.09.041
- Koblitz J., 2010, *MetBase*® ver. 7.3. Meteorite Data Retrieval Software. Ritterhude, Germany

- Lu Y., Makishima A., Nakamura E., 2007, *Coprecipitation of Ti, Mo, Sn and Sb with fluorides and application to determination of B, Ti, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Hf and Ta by ICP-MS*, Chemical Geology, 236(1-2), s. 13–26. doi:10.1016/j.chemgeo.2006.08.007
- MetBull, 2024, *The Meteoritical Bulletin Database*, The Meteoritical Society; <https://www.lpi.usra.edu/meteor/> [dostęp: 29.02.2024].
- Metzler K., Hezel D.C., Barosch J., Wölfer E., Schneider J.M., Hellmann J.L., Berndt J., Stracke A., Gattacceca J., Greenwood R.C., Franchi I.A., Burkhardt C., Kleine T., 2021, *The Loongana (CL) group of carbonaceous chondrites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 304, s. 1–31. doi:10.1016/j.gca.2021.04.007
- Morlok A., Bischoff A., Stephan T., Floss C., Zinner E., Jeeberger E.K., 2006, *Brecciation and chemical heterogeneities of CI chondrites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, s. 5371–5394. doi:10.1016/j.gca.2006.08.007
- Münker C., Pfänder J.A., Weyer S., Büchl A., Kleine T., Mezger K., 2003, *Evolution of Planetary Cores and the Earth-Moon System from Nb/Ta Systematics*, Science, 301(5629), s. 84–87. doi:10.1126/science.1084662
- Pourmand A., Dauphas N., Ireland T.J., 2012, *A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances*, Chemical Geology, 291, s. 38–54. doi:10.1016/j.chemgeo.2011.08.011
- Rose G., 1863, *Beschreibung und Eintheilung der Meteoriten auf Grund der Sammlung im mineralogischen Museum zu Berlin*, Der Druckerei der Königlichen Akademie der Wissenschaften, Berlin.
- Rubin A.E., 1997, *Mineralogy of meteorite groups*, Meteoritics & Planetary Science, 32(2), s. 231–247. doi:10.1111/j.1945-5100.1997.tb01262.x
- Rubin A.E., Ma C., 2017, *Meteoritic minerals and their origins*, Chemie der Erde, 77(3), s. 325–385. doi:10.1016/j.chemer.2017.01.005
- Tonui E., Zolensky M., Hiroi T., Nakamura T., Lipschutz M.E., Wang M.S., Okudaira K., 2014, *Petrographic, chemical and spectroscopic evidence for thermal metamorphism in carbonaceous chondrites I: CI and CM chondrites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 126(3), s. 284–306. doi:10.1016/j.gca.2013.10.053
- Tsuchiyama A., Mashio E., Imai Y., Noguchi T., Miura Y., Yano H., Nakamura T., 2009, *Strength Measurement of Carbonaceous Chondrites and Micrometeorites Using Micro Compression Testing Machine (abstract)*, Meteoritics and Planetary Science Supplement, s. 5189.
- Wang Z., Becker H., Wombacher F., 2014, *Mass Fractions of S, Cu, Se, Mo, Ag, Cd, In, Te, Ba, Sm, W, Tl and Bi in Geological Reference Materials and Selected Carbonaceous Chondrites Determined by Isotope Dilution ICP-MS*, Geostandards and Geoanalytical Research, 39(2), s. 185–208. doi:10.1111/j.1751-908X.2014.00312.x
- Wasson J.T., 1985, *Meteorites: Their Record of the Early Solar-System History*, Freeman, New York.
- Wiik H.B., 1956, *The chemical composition of some stony meteorites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 9(5-6), s. 279–289. doi:10.1016/0016-7037(56)90028-X
- Wolf S.F., Unger D.L., Friedrich J.M., 2005, *Determination of cosmochemically volatile trace elements in chondritic meteorites by inductively coupled plasma mass spectrometry*, Analytica Chimica Acta, 528(1), s. 121–128. doi:10.1016/j.aca.2004.10.016
- Zolensky M.E., Abreu N.M., Velbel M.A., Rubin A., Chaumard N., Noguchi T., Michikami T., 2018, *Chapter 2 – Physical, Chemical, and Petrological Characteristics of Chondritic Materials and Their Relationships to Small Solar System Bodies*, w: *Primitive Meteorites and Asteroids* (Ed. Abreu N.), Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-813325-5.00002-1