

Konrad BLUTSTEIN¹, Tadeusz A. PRZYLIBSKI¹, Katarzyna ŁUSZCZEK¹,
Joanna GRUCHOT¹

Skład chondrytów węglistych jako wyznacznik zasobności planetoid typu C w surowce metaliczne

Composition of carbonaceous chondrites as an indicator of the abundance of C-type asteroids in metallic resources

Abstract: The chemical composition of carbonaceous chondrites was analysed in terms of the content of selected 24 metals, including noble metals and rare-earth metals. Based on the obtained results, the abundance of C-type asteroids in metallic raw materials was estimated and compared to the concentration of terrestrial deposits and the average content in the Earth's crust. All the analysed elements, except rare earths, showed higher concentrations in carbonaceous chondrites than in the Earth's crust, but most of them did not match the Earth's deposit contents. The exception is Fe and Ni, the concentrations of which in carbonaceous chondrites significantly exceed the Earth's deposit concentrations. The profitability of mining operations on C-type asteroids is also increased by the number of accompanying mineral commodities, mainly metals (Cr, Co, Cu, Au, Pt, Pd, Ag), and water ice. In addition, the parent bodies of carbonaceous chondrites occur relatively close to the moons of Jupiter and Saturn – potential space mission targets.

Keywords: carbonaceous chondrite, meteorite, C-type asteroid, asteroid belt, extraterrestrial resources, extraterrestrial mining, metal

Wstęp

Pozyskiwanie surowców leży u podstaw rozwoju cywilizacji, jaką człowiek stworzył na Ziemi. Górnictwo, obok szeroko rozumianego rolnictwa, jest najbardziej podstawową gałęzią gospodarki dostarczającą surowców do wszystkich pozostałych dziedzin gospodarki i aktywności naszego gatunku. Bez górnictwa człowiek nie jest w stanie wytwarzać dóbr materialnych i utrwać wytworów kultury niematerialnej. Zaspokojenie potrzeb naszej cywilizacji w surowce jest powodem rozwoju nowej gałęzi górnictwa, jakim jest górnictwo pozaziemskie, do niedawna postrzegane jedynie jako aktywność człowieka przedstawiana w literaturze, kinematografii

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa, Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej; Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27; 50-370 Wrocław; e-mail: konrad.blutstein@pwr.edu.pl

i grach komputerowych z dziedziny science-fiction. Obecnie jednak, kiedy coraz dobitniej uświadamiamy sobie, że zasoby złóż różnorodnych surowców zgromadzonych na Ziemi są ograniczone, gdy rozumiemy, że złoża naszej planety zaczną się prędzej lub później wyczerpywać, zaczynamy myśleć o górnictwie pozaziemskim jako o realnej potrzebie. Mimo tego, że wciąż często górnictwo pozaziemskie jest ignorowane i traktowane lekceważąco, nasza cywilizacja stanie w końcu przed koniecznością poszukiwania i eksploataowania zasobów złóż surowców pozaziemskich. Na razie jednak zasoby naturalne naszej planety wciąż są bardzo duże i nie do końca poznane, a ilość niespełnionych przepowiedni wyczerpania się złóż surowców jest porównywalna do ilości przepowiadanych końców świata, które nie nadeszły. Istnieje jednak drugi, mniej oczywisty, ale o wiele istotniejszy powód rozwoju górnictwa pozaziemskiego. Jest to ekspansja naszej cywilizacji poza naszą planetę. Bez względu na to, czy będzie ona prowadzona przez człowieka osobiście, czy też, przynajmniej na pierwszym etapie, za pośrednictwem dronów i robotów, będzie wymagała bardzo dużej ilości surowców. Nieuchronna, napędzana wrodzoną ciekawością ekspansja naszego gatunku poza Ziemię stanie się wkrótce podstawą konieczności rozwoju górnictwa pozaziemskiego. Obecnie dostarczenie poza Ziemię kilograma surowców to koszt około 5000 USD w przypadku małych transportów oferowanych przez SpaceX lub około 5700 USD w przypadku większych transportów oferowanych przez United Launch Alliance (Foxbusiness 2020). Istnieje więc ekonomiczne uzasadnienie dla alternatywnego sposobu zaopatrzenia w surowce niezbędne dla utrzymania działalności człowieka poza Ziemią. Taką alternatywę zapewnia rozwój górnictwa pozaziemskiego umożliwiającego zaopatrzenie w surowce przyszłych misji kosmicznych, czy też kolonii pozaziemskich. Nie bez powodu Luksemburg w 2017 roku oraz USA w 2020 roku utworzyły prawo regulujące kwestie wydobycia surowców poza Ziemią. Także podczas sesji plenarnej „Kosmiczne wyzwania dla nauki, polityki i gospodarki” w ramach „I Konsiliencyjnej Konferencji Kosmicznej” prof. dr hab. Grzegorz Wrochna, prezes Polskiej Agencji Kosmicznej, oficjalnie zakomunikował, iż trwają prace nad projektem polskiej ustawy kosmicznej (Szlachetko 2021).

Wśród wskazywanych potencjalnych obiektów eksploatacji górniczej są Księżyc, Mars a także planetoidy, zarówno te krążące w pobliżu Ziemi (tzw. z ang. NEA – Near Earth Asteroids) jak i znajdujące się w pasie planetoid. Planetoidy typu C, będące zapewne ciałami macierzystymi chondrytów węglistych, stanowią aż 75% wszystkich planetoid w pasie planetoid (Hutchison 2006), są więc znacznie bardziej powszechne niż ich fragmenty docierające do Ziemi. Jako ciała macierzyste chondrytów węglistych wskazywane są również planetoidy typu B, typu G (dla grupy CI), typu F (dla grup CI oraz CM) oraz typu K (dla grup CV oraz CO) (Gaffey i in. 1993). Badania planetoid ograniczają się w praktyce w przeważającej większości do analiz spektralnych (Sears 2004). Planetoidy typu C charakteryzują się albedo na poziomie $0,06 \pm 0,02$ i występują przede wszystkim na zewnętrznych obrzeżach pasa planetoid (Łuszczek 2021). Największe znane planetoidy typu C to: 10 Hygeia, 24 Themis, 90 Antiope, 121 Hermione, 128 Nemesis, 569 Misa oraz 1128 Astrid (Sears 2004; Nesvorný i in. 2005). Dzięki

porównywaniu spektrów planetoid i meteorytów jest możliwe określenie potencjalnych ciał macierzystych, a tym samym w konsekwencji poznanie składu chemicznego i mineralnego planetoid na podstawie badań pochodzących z nich meteorytów. Należy mieć jednak na uwadze, że meteoryty odnalezione na Ziemi są w pewnym stopniu zmienione na skutek oddziaływania przede wszystkim temperatury, a także ciśnienia podczas wejścia meteoroidu w atmosferę i upadku meteorytu na powierzchnię Ziemi. Następnie meteoryty są poddawane oddziaływaniu ziemskich czynników atmosferycznych. Procesy wietrzenia ziemskiego przeobrażają powierzchnię meteorytów a tempo oraz głębokość tych zmian zależą od warunków klimatycznych panujących w miejscu spadku oraz budowy samego meteorytu. Okazy zebrane krótko po spadku bardzo dobrze reprezentują swoje skały macierzyste występujące na planetoidach, z których pochodzą, tak pod względem właściwości fizycznych, jak i cech strukturalnych oraz składu mineralnego i chemicznego (Sears 2004).

Ostatnie dwa lata przyniosły jednak ogromny postęp w badaniach planetoid typu C i tym samym stworzyły zupełnie nowe możliwości odnoszenia wyników badań chondrytów węglistych do charakteryzowania ich ciał macierzystych. Stało się tak za sprawą zakończonej sukcesem misji kosmicznej Hayabusa 2 (jap. Sokół wędrowny 2) organizowanej przez Japońską Agencję Eksploracji Aerokosmicznej JAXA (ang. Japan Aerospace Exploration Agency). Celem misji była planetoida typu C – 162173 Ryugu. Jest to planetoida z grupy Apolla okrążająca Słońce w ciągu 1 roku i 109 dni w średniej odległości 1,19 ja. Została odkryta 10 maja 1999 roku. Planetoida ta ma masę $4,5 \times 10^{11}$ kg, a jej promień wynosi 435 m. Nazwa Ryugu jest nazwą podwodnego pałacu Boga Smoka. Według japońskiej legendy, rybak w czasie pobytu w pałacu otrzymał pudełko z niespodzianką. Legenda ta stała się motywem analogii misji Hayabusa 2, która przywozła na Ziemię pojemnik zawierający próbki skał z powierzchni asteroidy (Minor Planet Center 2022). Wyniki badań przywiezionych próbek sukcesywnie ujawniają „tajemnice” właściwości fizycznych i składu chemicznego skał tworzących powierzchnię planetoidy 162173 Ryugu, które są charakterystyczne dla planetoid typu C, stanowiących ciała macierzyste chondrytów węglistych. Wyniki dotychczasowych badań potwierdzają dużą zawartość węgla (związków organicznych), obecność procesów uwodnienia minerałów (obecność w ich strukturze grup OH), brak submilimetrycznych inkluzji CAI oraz chondr, co najbardziej upodabnia te skały do chondrytów węglistych typu CI. Stwierdzono także obecność węglanów, z których niektóre zawierają znaczną ilość żelaza, a także związków zawierających grupy NH, jak również składników lotnych, które mogą być pozostałościami pierwotnych związków lotnych występujących w młodym zewnętrznym Układzie Słonecznym, jak i pozostałościami po późniejszych procesach uwodnienia minerałów (Pilorget i in. 2021; Yada i in. 2021).

Chondryty węgliste są klasą chondrytów charakteryzującą się najbardziej pierwotnym składem chemicznym, tzn. składem najbardziej zbliżonym do składu pierwotnej pozasłonecznej materii stałej formującego się Układu Słonecznego, z której tworzyły się pierwsze planetozymale – ciała będące prekursorami dzisiej-

szych planet i małych ciał Układu Słonecznego. Obecnie wyróżnia się 9 grup tych chondrytów: CI, CM, CO, CV, CK, CR, CH, CB oraz CL (Metzler 2021) różniące się cechami petrograficznymi i mineralnymi. Najbardziej zbliżone do tego pierwotnego składu chemicznego są chondryty węgliste grupy CI oraz matrix występujące w innych grupach chondrytów węglistych (Anders i Grevesse 1989; Łuszczek 2021). Ponadto chondryty węgliste w ograniczonym stopniu doświadczyły metamorfizmu termicznego, natomiast zarejestrowały oddziaływanie wody w stanie ciekłym, czego pozostałością są minerały zawierające grupy OH (Huchison 2006).

W ramach niniejszej pracy autorzy dokonali analizy składu chemicznego chondrytów węglistych jako materiału reprezentatywnego dla ich ciał macierzystych – planetoid typu C, wykorzystując do tego metadane. Celem pracy jest określenie potencjału górniczego ciał macierzystych chondrytów węglistych ze względu na ewentualne nagromadzone zasoby surowców metalicznych.

Materiał i metody badań

Dane wykorzystane do badań zostały pozyskane z bazy danych MetBase[®] (Koblitz, 2010). Dotoczyły one zawartości wybranych metali ciężkich, metali szlachetnych oraz metali ziem rzadkich w chondrytach węglistych grup: CI, CM, CO, CV, CK, CR, CH oraz CB. Wyniki uśrednione analiz chemicznych chondrytów węglistych (ang. *bulk chemical composition*) zostały poddane przez autorów analizie statystycznej przy użyciu programów Microsoft Excel[®] oraz Statistica[®]. Dla każdego pierwiastka (metal) wyznaczono wartość średnią, medianę, odchylenie standardowe oraz wartość minimalną i maksymalną zawartości w uśrednionym składzie skały – chondrytu węglistego. Uzyskane średnie wartości zawartości wybranych metali w chondrytach węglistych zostały zestawione ze średnią zawartością tych metali w skorupie ziemskiej oraz w rudach metali występujących w złożach ziemskich.

Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartości wybranych metali dla całej klasy chondrytów węglistych.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CI. W grupie tej powyżej średniej zawartości we wszystkich chondrytach węglistych (por. tab. 1) występuje miedź (129 ppm) oraz srebro (199 ppb).

W tabeli 3 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CM. W grupie tej powyżej średniej zawartości we wszystkich chondrytach węglistych (por. tab. 1) występuje miedź (141 ppm), złoto (165 ppb) oraz srebro (148 ppb).

W tabeli 4 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CO. Meteority tej grupy są jednymi z bardziej zasobnych w metale wśród chondrytów węglistych. W grupie tej powyżej średniej zawartości we wszystkich chondrytach węglistych (por. tab. 1) występuje żelazo (24,83%), nikiel (1,33%), chrom

Tabela 1. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych; σ – odchylenie standardowe.

Table 1. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	354	361	326	378	91	302	81	74	118	197	69	31
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	23,35	1,25	0,33	618	91	157	1229	656	130	409	1018	159
mediana	23,34	1,29	0,34	600	125	153	1200	624	110	378	936	143
σ	5,10	0,51	0,05	234	38	48	470	148	91	207	324	50
min	14,40	0,12	0,08	100	51	16	600	330	24	177	569	90
max	79,00	5,60	0,51	2600	320	473	4500	1430	744	2830	2200	260
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	70	220	189	63	54	80	54	46	24	207	169	50
jednostka	ppb											
średnia	759	248	91	327	62	375	92	236	43	254	39	2335
mediana	674	240	88	290	56	360	90	223	38	243	38	2320
σ	272	66	24	94	21	113	31	57	11	64	10	610
min	315	100	20	180	20	200	53	150	22	86	19	1120
max	1690	520	198	540	140	890	230	356	66	600	83	3740

Tabela 2. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CI; σ – odchylenie standardowe.

Table 2. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CI carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	30	34	28	28	16	31	22	20	14	18	15	9
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	18,42	1,08	0,26	503	129	150	967	568	199	269	712	110
mediana	18,46	1,08	0,26	514	128	140	964	562	202	252	640	110
σ	1,29	0,13	0,05	55	16	49	174	112	38	60	152	19
min	14,40	0,74	0,08	332	106	86	600	330	128	200	569	90
max	22,00	1,56	0,40	629	164	357	1370	980	294	481	1150	156
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	16	19	22	13	10	14	10	12	6	22	15	16
jednostka	ppb											
średnia	502	162	60	220	43	253	61	176	31	176	28	1656
mediana	475	153	58	204	44	252	62	174	32	168	26	1565
σ	65	23	8	30	8	29	6	18	5	19	5	302
min	415	120	48	180	31	200	53	150	22	140	23	1120
max	671	208	75	275	55	300	73	205	36	209	38	2330

Tabela 3. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CM; σ – odchylenie standardowe.

Table 3. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CM carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	76	70	71	105	22	82	20	18	41	43	17	8
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	21,16	1,21	0,30	558	141	165	1114	632	148	316	831	129
mediana	21,15	1,24	0,30	559	132	160	1079	624	125	320	853	128
σ	1,19	0,19	0,04	221	43	44	164	74	111	34	89	8
min	18,50	0,14	0,20	180	103	74	860	510	33	227	645	117
max	23,90	1,52	0,44	2600	320	473	1490	790	744	440	941	143
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	18	46	46	19	10	23	12	16	7	48	37	12
jednostka	ppb											
średnia	618	206	78	273	48	326	74	214	37	220	34	2256
mediana	634	210	79	281	52	330	72	218	37	220	34	2290
σ	62	20	7	25	11	433	6	22	2	21	5	148
min	476	148	59	201	20	245	68	166	34	168	25	2000
max	693	256	107	298	57	440	90	260	40	300	51	2460

Tabela 4. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CO; σ – odchylenie standardowe.

Table 4. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CO carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	49	49	42	42	10	28	6	7	11	11	2	1
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	24,83	1,33	0,35	633	131	184	1229	750	89	432	1125	166
mediana	24,65	1,37	0,34	672	136	182	1227	705	84	379	1125	166
σ	1,45	0,22	0,03	135	19	27	288	133	18	112	65	-
min	22,72	0,79	0,30	290	84	128	710	585	63	338	1060	166
max	30,20	1,72	0,49	940	151	260	1700	1040	129	710	1190	166
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	4	15	12	4	1	4	2	2	1	11	8	4
jednostka	ppb											
średnia	889	258	99	395	72	414	95	301	47	276	39	2758
mediana	888	243	97	388	72	420	95	301	47	270	39	2915
σ	98	36	10	44	-	14	1	28	-	25	4	454
min	761	205	82	343	72	390	94	273	47	235	34	2000
max	1020	334	124	462	72	427	96	329	47	336	47	3200

(0,35%), kobalt (633 ppm), miedź (131 ppm), złoto (184 ppb), pallad (750 ppb), lantan (432 ppb), cer (1125 ppb), prazeodym (166 ppb), neodym (889 ppb), samar (258 ppb), europ (99 ppb), gadolin (395 ppb), terb (72 ppb), dysproz (414 ppb), holm (95 ppb), erb (301 ppb), tul (47 ppb), iterb (276 ppb) oraz itr (2758 ppb).

W tabeli 5 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CV. W grupie tej powyżej średniej zawartości we wszystkich chondrytach węglistych (por. tab. 1) występuje żelazo (23,49%), nikiel (1,30%), chrom (0,35%), kobalt (626 ppm), miedź (120 ppm), lantan (564 ppb), cer (1348 ppb), prazeodym (216 ppb), neodym (1063 ppb), samar (324 ppb), europ (118 ppb), gadolin (436 ppb), terb (79 ppb), dysproz (476 ppb), holm (115 ppb), erb (312 ppb), tul (56 ppb), iterb (322 ppb), lutet (51 ppb) oraz itr (2856 ppb).

W tabeli 6 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CK. W tym przypadku nie było dostępnych danych dotyczących zawartości prazeodymu oraz tulu. W grupie tej powyżej średniej zawartości we wszystkich chondrytach węglistych (por. tab. 1) występuje żelazo (23,39%), chrom (0,35%), miedź (112 ppm), platyna (1578 ppb), pallad (680 ppb), lantan (453 ppb), cer (1261 ppb), neodym (963 ppb), samar (284 ppb), europ (106 ppb), gadolin (434 ppb), terb (92 ppb), dysproz (555 ppb), holm (136 ppb), erb (302 ppb), iterb (305 ppb), lutet (44 ppb) oraz itr (3200 ppb).

Tabela 5. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CV; σ – odchylenie standardowe.

Table 5. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CV carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	78	81	72	78	23	61	14	17	25	47	24	12
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	23,49	1,30	0,35	626	120	153	1425	680	96	564	1348	216
mediana	23,58	1,39	0,36	641	115	151	1357	683	93	513	1330	210
σ	1,29	0,30	0,03	100	28	21	259	57	16	338	259	23
min	19,25	0,14	0,21	100	96	105	1060	598	79	381	900	190
max	27,30	1,61	0,45	900	230	230	2000	841	158	2830	2200	260
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	18	55	47	17	23	22	20	10	8	46	40	14
jednostka	ppb											
średnia	1063	324	118	436	79	476	115	312	56	322	51	2856
mediana	1036	327	113	420	76	458	105	302	55	314	49	2955
σ	277	47	19	49	16	73	31	28	5	52	9	314
min	315	180	93	370	48	360	90	280	50	240	35	2000
max	1690	520	198	540	140	700	230	356	66	600	83	3220

Tabela 6. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CK; σ – odchylenie standardowe.

Table 6. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CK carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	37	39	35	41	4	31	5	1	9	22	3	0
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	23,39	1,04	0,35	582	112	118	1578	680	73	453	1261	–
mediana	23,86	1,18	0,36	600	112	110	1570	680	79	442	1241	–
σ	1,30	0,43	0,03	137	15	64	234	–	22	74	106	–
min	19,59	0,29	0,29	275	92	16	1310	680	27	319	1142	–
max	25,80	1,74	0,42	890	135	404	1880	680	110	700	1400	–
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	6	24	24	4	1	5	2	2	0	24	22	2
jednostka	ppb											
średnia	963	284	106	434	92	555	136	302	–	305	44	3200
mediana	914	276	106	431	92	476	136	302	–	300	43	3200
σ	111	46	12	50	–	168	34	6	–	42	7	540
min	840	208	84	376	92	455	103	297	–	242	36	2660
max	1130	420	140	496	92	890	170	308	–	450	73	3740

Tabela 7. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CR; σ – odchylenie standardowe.

Table 7. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CR carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	35	39	34	37	6	31	8	6	5	26	3	0
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	23,96	0,91	0,36	662	86	131	1121	775	66	411	893	–
mediana	23,78	1,27	0,37	650	88	141	1165	743	52	382	840	–
σ	1,86	0,63	0,03	113	8	35	250	131	26	109	144	–
min	20,90	0,12	0,27	460	74	57	730	591	43	300	750	–
max	30,60	2,10	0,40	1140	99	178	1500	984	113	755	1090	–
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	3	28	15	1	3	4	3	0	0	27	26	0
jednostka	ppb											
średnia	767	233	85	316	50	332	95	–	–	251	36	–
mediana	792	228	86	316	50	358	96	–	–	242	34	–
σ	144	34	4	–	4	67	6	–	–	27	5	–
min	580	182	74	316	46	220	87	–	–	194	25	–
max	930	325	90	316	55	390	103	–	–	318	47	–

W tabeli 7 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CR. W tym przypadku nie uzyskano danych dotyczących zawartości prazeodymu, erbu, tulu oraz itru. W grupie tej powyżej średniej zawartości we wszystkich chondrytach węglistych (por. tab. 1) występuje żelazo (23,96%), chrom (0,36%), kobalt (662 ppm), pallad (775 ppb), lantan (411 ppb), neodym (767 ppb) oraz holm (95 ppb).

W tabeli 8 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CH. W tym przypadku autorzy nie uzyskali danych dotyczących zawartości palladu, prazeodymu, erbu oraz itru. W grupie tej powyżej średniej zawartości we wszystkich chondrytach węglistych (por. tab. 1) występuje żelazo (34,58%), nikiel (2,28%), kobalt (952 ppm), miedź (97 ppm), złoto (237 ppb), platyna (1600 ppb) oraz srebro (182 ppb).

W tabeli 9 przedstawiono wyniki uzyskane dla chondrytów węglistych grupy CB. W tym przypadku w dostępnej bazie danych nie było wyników dotyczących zawartości srebra, ceru, prazeodymu, neodymu, gadolinu, terbu, dysprozu, holmu, erbu, tulu oraz itru. W grupie tej powyżej średniej zawartości dla wszystkich chondrytów węglistych (por. tab. 1) występuje żelazo (73,15%), nikiel (4,36%), kobalt (1812 ppm), złoto (278 ppb), platyna (4500 ppb) oraz pallad (1430 ppb).

Tabela 8. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CH; σ – odchylenie standardowe.

Table 8. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CH carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
liczba danych	11	12	10	13	4	12	4	0	2	10	1	0
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	34,58	2,28	0,30	952	97	237	1600	–	182	298	730	–
mediana	34,95	2,43	0,32	1010	84	219	1550	–	182	290	730	–
σ	8,58	0,49	0,10	252	25	61	212	–	158	33	–	–
min	19,80	1,27	0,12	384	80	143	1400	–	24	264	730	–
max	50,50	3,06	0,46	1400	140	358	1900	–	340	380	730	–
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	1	11	10	1	4	4	4	0	1	10	10	0
jednostka	ppb											
średnia	550	181	72	290	45	312	80	–	38	210	31	–
mediana	550	180	70	290	40	305	85	–	38	200	30	–
σ	–	11	22	–	9	29	12	–	–	20	2	–
min	550	160	20	290	40	280	60	–	38	190	29	–
max	550	197	110	290	60	360	90	–	38	250	34	–

Tabela 9. Podstawowe statystyki opisowe charakteryzujące zawartość wybranych metali w uśrednionym składzie chemicznym chondrytów węglistych CB; σ – odchylenie standardowe.

Table 9. Basic descriptive statistics characterizing the content of selected metals in the bulk chemical composition of CB carbonaceous chondrites; σ – standard deviation.

	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Au	Pt	Pd	Ag	La	Ce	Pr
Liczba danych	2	3	3	3	1	1	1	1	0	2	0	0
jednostka	%			ppm		ppb						
średnia	73,15	4,36	0,28	1812	51	278	4500	1430	–	178	–	–
mediana	73,15	4,75	0,27	2220	51	278	4500	1430	–	178	–	–
σ	5,85	1,20	0,01	783	–	–	–	–	–	0	–	–
min	67,30	2,74	0,26	717	51	278	4500	1430	–	177	–	–
max	79,00	5,60	0,30	2500	51	278	4500	1430	–	178	–	–
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
liczba danych	0	2	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0
jednostka	ppb											
średnia	–	105	42	–	–	–	–	–	–	120	19	–
mediana	–	105	42	–	–	–	–	–	–	120	19	–
σ	–	5	6	–	–	–	–	–	–	–	–	–
min	–	100	37	–	–	–	–	–	–	120	19	–
max	–	110	48	–	–	–	–	–	–	120	19	–

Dyskusja wyników

W tabeli 10 zestawiono średnie zawartości metali w poszczególnych grupach oraz całej klasie chondrytów węglistych ze średnią zawartością tych metali w skorupie ziemskiej oraz w złożach skorupy kontynentalnej. Kolorem zielonym zaznaczono średnie zawartości większe niż w skorupie ziemskiej, czerwonym zaś zawartości większe niż w złożach. Metale ciężkie charakteryzują się znacznie większymi koncentracjami niż w skorupie ziemskiej. Metale szlachetne również wykazują większe koncentracje niż w skorupie ziemskiej, z wyłączeniem srebra w grupie chondrytów CR, jednak ich koncentracje są znacznie mniejsze niż w ziemskich złożach. Chondryty węgliste są ubogie w pierwiastki ziem rzadkich, których zawartość jest znacznie mniejsza niż w skorupie ziemskiej.

Na rysunkach 1–10 przedstawiono porównanie poziomów koncentracji wybranych metali w chondrytach węglistych względem średniej zawartości tych metali w skorupie ziemskiej oraz w złożach. W tabeli 11 przedstawiono natomiast wzbogacenie lub zubożenie chondrytów węglistych w dany metal względem średniej zawartości tych metali w skorupie ziemskiej.

Największa koncentracja żelaza występuje w chondrytach grupy CB – 73,15%. Koncentrację przekraczającą 25%, charakterystyczną dla złóż ziemskich, charakteryzują się również chondryty grupy CH, gdzie wynosi ona 34,58%. W pozostałych grupach chondrytów węglistych koncentracja Fe wynosi od 18,42% do

24,83%. Wartości te znacznie przekraczają średnią zawartość tego metalu w skorupie ziemskiej, tj. 5,60% (rys. 1, tab. 10 i 11).

Chondryty węgliste wykazują bardzo dużą zawartość niklu zarówno względem średniej zawartości Ni w skorupie ziemskiej jak i w ziemskich złożach. Wszystkie

Tabela 10. Porównanie koncentracji metali w poszczególnych grupach chondrytów węglistych z koncentracjami tych metali w skorupie ziemskiej oraz w ziemskich złożach. Kolorem zielonym zaznaczono średnie zawartości większe niż w skorupie ziemskiej, czerwonym zaś zawartości większe niż w złożach.

Table 10. Comparison of metal concentrations in particular groups of carbonaceous chondrites with the concentrations of these metals in the earth's crust and in the Earth's deposits. Green is the average content greater than in the Earth's crust, and red is the content greater than in the deposits.

skorupa ziemska (Craig i in., 2003)	złoża (Nieć, 1994)	CI	CM	CO	CV	CK	CR	CH	CB	chondryty węgliste	
%											
Fe	5,60	25,00	18,42	21,16	24,83	23,49	23,39	23,96	34,58	73,15	23,35
Ni	0,0075	0,70	1,08	1,21	1,33	1,30	1,04	0,91	2,28	4,36	1,25
Cr	0,0025	b.d.	0,26	0,30	0,35	0,35	0,35	0,36	0,30	0,28	0,33
ppm											
Co	100	10000	503	558	633	626	582	662	952	1812	618
Cu	55	5000	129	141	131	120	112	86	97	51	91
ppb											
Au	4	1000	150	165	184	153	118	131	237	278	157
Pt	5	b.d.	967	1114	1229	1425	1578	1121	1600	4500	1229
Pd	10	b.d.	568	632	750	680	680	775	–	1430	656
Ag	70	50000	199	148	89	96	73	66	182	–	130
La	50000	b.d.	269	316	432	564	453	411	298	178	409
Ce	83000	b.d.	712	831	1125	1348	1261	893	730	–	1018
Pr	130000	b.d.	110	129	166	216	–	–	–	–	159
Nd	44000	b.d.	502	618	889	1063	963	767	550	–	759
Sm	7700	b.d.	162	206	258	324	284	233	181	105	248
Eu	2200	b.d.	60	78	99	118	106	85	72	42	91
Gd	6300	b.d.	220	273	395	436	434	316	290	–	327
Tb	1000	b.d.	43	48	72	79	92	50	45	–	62
Dy	8500	b.d.	253	326	414	476	555	332	312	–	375
Ho	1600	b.d.	61	74	95	115	136	95	80	–	92
Er	3600	b.d.	176	214	301	312	302	–	–	–	236
Tm	520	b.d.	31	37	47	56	–	–	38	–	43
Yb	3400	b.d.	176	220	276	322	305	251	210	120	254
Lu	800	b.d.	28	34	39	51	44	36	31	19	39
Y	35000	0,38%	1656	2256	2758	2856	3200	–	–	–	2335

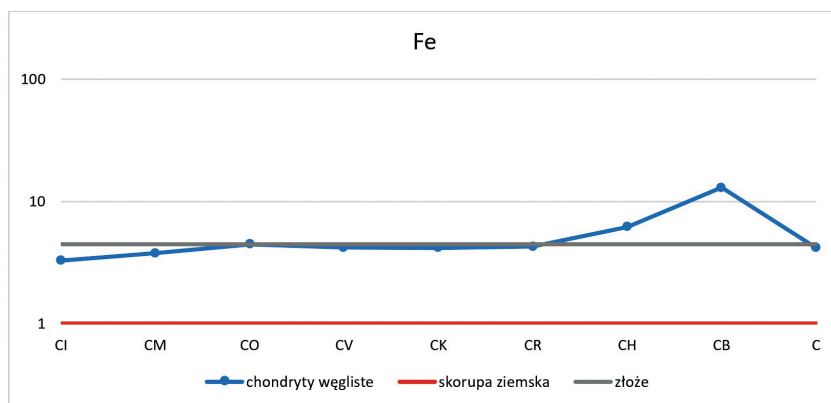
Tabela 11. Krotność koncentracji metali w poszczególnych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych względem koncentracji w skorupie ziemskiej; pogrubioną czcionką oznaczono wartości oznaczające wzbogacenie zawartości metalu względem jego zawartości w skorupie ziemskiej (>1).

Table 11. Multiplicity of the metal concentration in individual groups of carbonaceous chondrites and in the average composition of carbonaceous chondrites in relation to the concentration in the earth's crust; bold letters denote the values of the enrichment of the metal content in relation to its content in the earth's crust (>1).

	CI	CM	CO	CV	CK	CR	CH	CB	chondryty węgliste
Fe	3,29	3,78	4,43	4,20	4,18	4,28	6,18	13,06	4,17
Ni	144,0	161,3	177,3	173,3	138,7	121,3	304,0	581,3	166,7
Cr	104,0	120,0	140,0	140,0	140,0	144,0	120,0	112,0	132,0
Co	5,03	5,58	6,33	6,26	5,82	6,62	9,52	18,12	6,18
Cu	2,34	2,56	2,38	2,18	2,04	1,56	1,76	0,93	1,65
Au	37,5	41,2	46,0	38,2	29,5	32,8	59,2	69,5	39,2
Pt	193,4	222,8	245,8	285,0	315,6	224,2	320,0	900,0	245,8
Pd	56,8	63,2	75,0	68,0	68,0	77,5	–	143,0	65,6
Ag	2,84	2,11	1,27	1,37	1,04	0,94	2,60	–	1,86
La	0,0054	0,0063	0,0086	0,0113	0,0091	0,0082	0,0060	0,0036	0,0082
Ce	0,0086	0,0100	0,0136	0,0162	0,0152	0,0108	0,0088	–	0,0123
Pr	0,0008	0,0010	0,0013	0,0017	–	–	–	–	0,0012
Nd	0,0114	0,0140	0,0202	0,0242	0,0219	0,0174	0,0125	–	0,0173
Sm	0,0210	0,0268	0,0335	0,0421	0,0369	0,0303	0,0235	0,0136	0,0322
Eu	0,0273	0,0355	0,0450	0,0536	0,0482	0,0386	0,0327	0,0191	0,0314
Gd	0,0349	0,0433	0,0627	0,0692	0,0689	0,0502	0,0460	–	0,0519
Tb	0,0430	0,0480	0,0720	0,0790	0,0920	0,0500	0,0450	–	0,0620
Dy	0,0298	0,0384	0,0487	0,0560	0,0653	0,0391	0,0367	–	0,0441
Ho	0,0381	0,0463	0,0594	0,0719	0,0850	0,0594	0,0500	–	0,0575
Er	0,0489	0,0594	0,0836	0,0867	0,0839	–	–	–	0,0656
Tm	0,0596	0,0712	0,0904	0,1077	–	–	0,0731	–	0,0827
Yb	0,0518	0,0647	0,0812	0,0947	0,0897	0,0738	0,0618	0,0353	0,0747
Lu	0,0350	0,0425	0,0488	0,0638	0,0550	0,0450	0,0388	0,0238	0,0488
Y	0,0473	0,0645	0,0788	0,0816	0,0914	–	–	–	0,0667

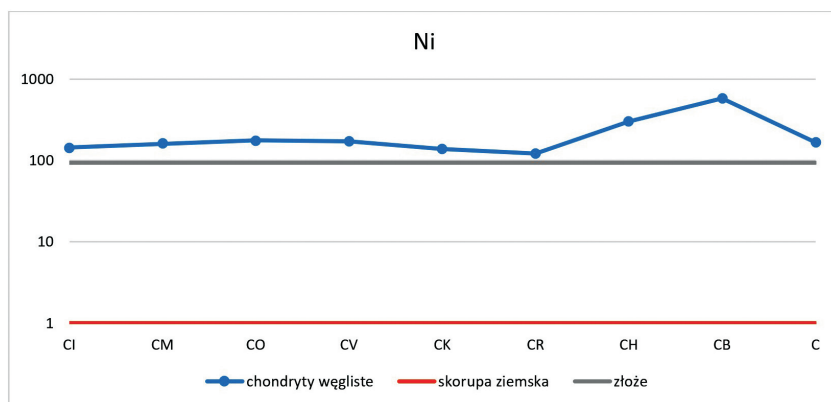
grupy chondrytów węglistych wykazują większą zawartość niklu niż minimalne zawartości dla złóż ziemskich. Najbardziej zasobne w nikiel są chondryty grupy CB, gdzie zawartość Ni wynosi 4,36%. W pozostałych grupach koncentracja Ni wynosi od 0,91% do 2,28%. Średnie zawartości niklu w chondrytach węglistych są ponad 100-krotnie większe niż w skorupie ziemskiej (rys. 2, tab. 10 i 11).

Średnia zawartość chromu w chondrytach węglistych mieści się w zakresie od 0,26% (CI) do 0,36% (CR). Wielkości te przekraczają średnią zawartość chromu w skorupie ziemskiej ponad 100-krotnie (rys. 3, tab. 10 i 11).



Rys. 1. Porównanie koncentracji żelaza w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Fe w skorupie ziemskiej i w ziemskich złożach żelaza.

Fig. 1. Comparison of iron concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Fe in the earth's crust and in the earth's iron deposits. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange, terrestrial deposit in gray.

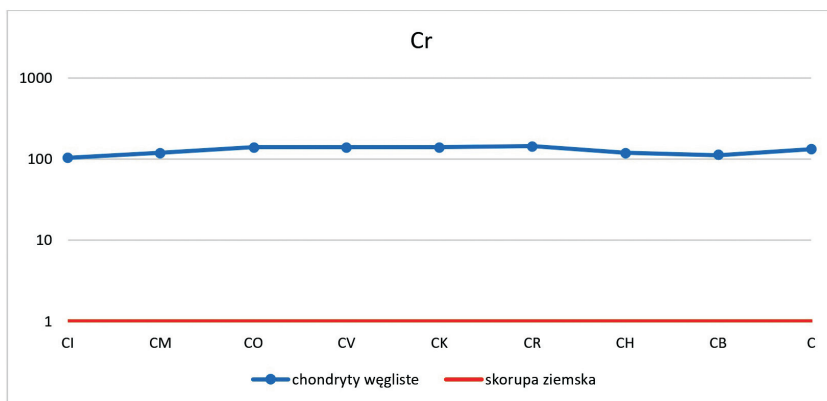


Rys. 2. Porównanie koncentracji niklu w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Ni w skorupie ziemskiej i w ziemskich złożach niklu.

Rys. 2. Comparison of nickel concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Ni in the earth's crust and in the earth's iron deposits. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange, terrestrial deposit in gray.

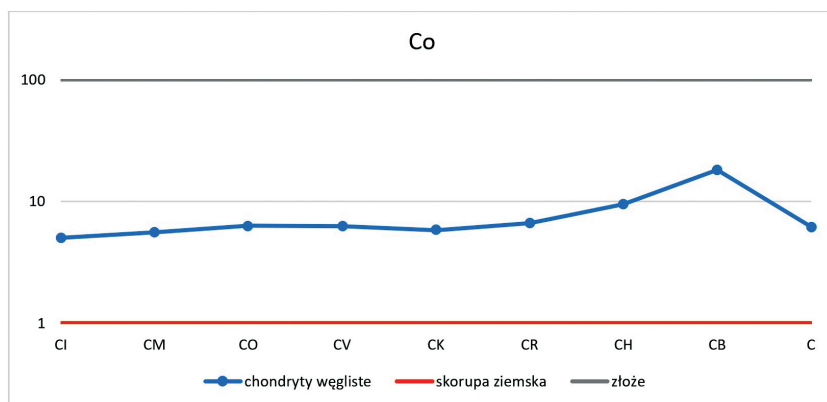
Kobalt w chondrytach węglistych występuje w koncentracjach przekraczających średnią zawartość tego metalu w skorupie ziemskiej. Średnie zawartości tego pierwiastka mieszczą się w zakresie od 503 ppm (CI) do 1812 ppm (CB). Koncentracja kobaltu w chondrytach węglistych jest znacznie mniejsza niż w ziemskich złożach kobaltu (rys. 4, tab. 10 i 11).

Średnia zawartość miedzi w chondrytach węglistych mieści się w zakresie od 51 ppm (CB) do 141 ppm (CM). Jedynie w chondrytach grupy CB zawartość ta



Rys. 3. Porównanie koncentracji chromu w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Cr w skorupie ziemskiej.

Fig. 3. Comparison of chromium concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Cr in the earth's crust. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange.



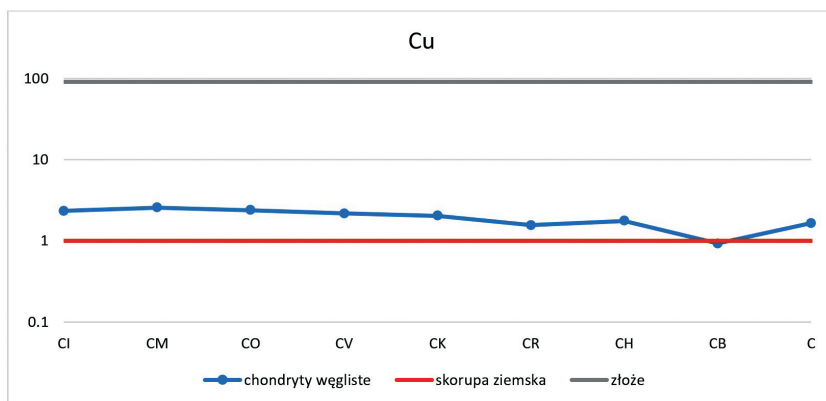
Rys. 4. Porównanie koncentracji kobaltu w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Co w skorupie ziemskiej i w ziemskich złożach kobaltu.

Fig. 4. Comparison of cobalt concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Co in the earth's crust and in the earth's iron deposits. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange, terrestrial deposit in gray.

jest mniejsza niż w skorupie ziemskiej. Jednakże w porównaniu ze złożami ziemskimi zawartości te są średnio niemal 50-krotnie mniejsze (rys. 5, tab. 10 i 11).

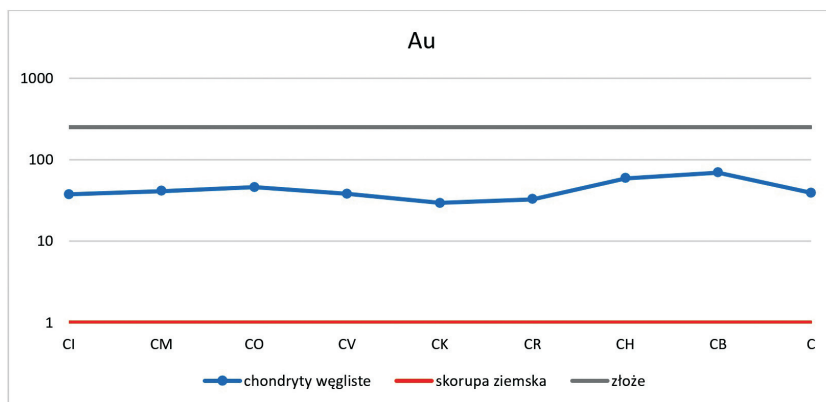
Złoto w chondrytach węglistych występuje w większych koncentracjach niż w skorupie ziemskiej. Wartości te mieszczą się w zakresie od 118 ppb (CK) do 278 ppb (CB). Są one jednak o rząd wielkości mniejsze w stosunku do zawartości w ziemskich złożach tego metalu (rys. 6, tab. 10 i 11).

Średnia zawartość platyny w chondrytach zwyczajnych znacznie przekracza średnią koncentrację tego metalu w skorupie ziemskiej. Zawartości te mieszczą się



Rys. 5. Porównanie koncentracji miedzi w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Cu w skorupie ziemskiej i w ziemskich złożach miedzi.

Fig. 5. Comparison of copper concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Cu in the earth's crust and in the earth's iron deposits. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange, terrestrial deposit in gray.

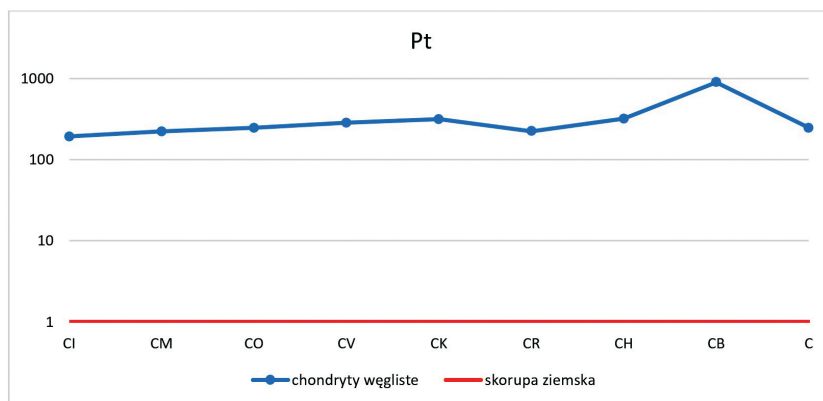


Rys. 6. Porównanie koncentracji złota w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Au w skorupie ziemskiej i w ziemskich złożach złota.

Fig. 6. Comparison of gold concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Au in the earth's crust and in the earth's iron deposits. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange, terrestrial deposit in gray.

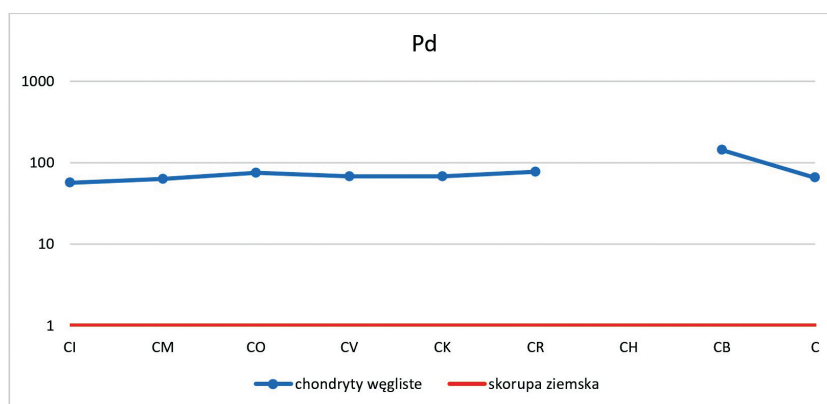
w zakresie od 967 ppb (CI) do 4500 ppb (CB). Oznacza to, że zawartości te są od 200 do 900 razy większe niż w skorupie ziemskiej (rys. 7, tab. 10 i 11).

W przypadku palladu autorzy nie dysponowali danymi dla chondrytów grupy CH. W pozostałych grupach koncentracja tego metalu mieści się w zakresie od 568 ppb (CI) do 1430 ppb (CB). Są to koncentracje większe o 50 do 140 razy w stosunku do skorupy ziemskiej (rys. 8, tab. 10 i 11).



Rys. 7. Porównanie koncentracji platyny w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Pt w skorupie ziemskiej.

Fig. 7. Comparison of platinum concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Pt in the earth's crust. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange.

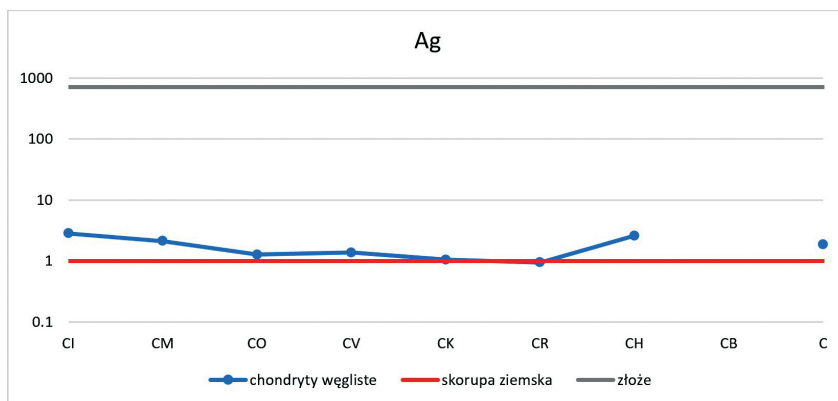


Rys. 8. Porównanie koncentracji palladu w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Pd w skorupie ziemskiej.

Fig. 8. Comparison of palladium concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Pd in the earth's crust. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange.

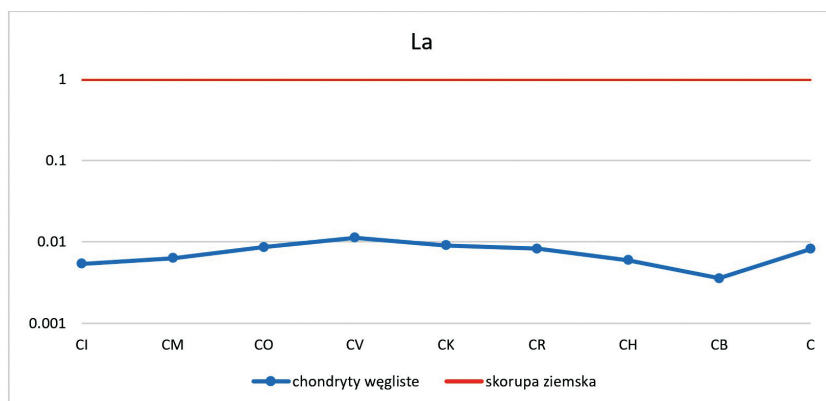
Dla srebra autorzy nie dysponowali danymi dla chondrytów grupy CB. Średnia zawartość Ag w pozostałych grupach mieści się w zakresie od 66 ppb (CR) do 199 ppb (CI). Dla chondrytów CR koncentracja srebra jest mniejsza niż w skorupie ziemskiej. W stosunku do ziemskich złóż, koncentracja srebra w chondrytach węglistych jest niemal 400-tu krotnie mniejsza.

Wszystkie metale ziem rzadkich w chondrytach węglistych wykazują koncentracje znacznie mniejsze niż w skorupie ziemskiej. Chondryty węgliste są najbardziej ubożone w prazeodym. Zawartość Pr w chondrytach węglistych grupy CI stanowi jedynie 0,0008 zawartości Pr w skorupie ziemskiej. Natomiast najmniej ubożone



Rys. 9. Porównanie koncentracji srebra w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji Ag w skorupie ziemskiej i w ziemskich złożach srebra.

Fig. 9. Comparison of silver concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of Ag in the earth's crust and in the earth's iron deposits. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange, terrestrial deposit in gray.



Rys. 10. Porównanie koncentracji lantanu w analizowanych grupach chondrytów węglistych oraz w średnim składzie chondrytów węglistych (C) względem koncentracji La w skorupie ziemskiej.

Fig. 10. Comparison of lanthanum concentration in the analyzed groups of carbonaceous chondrites and in the bulk composition of carbonaceous chondrites (C) in relation to the concentration of La in the earth's crust. Carbonaceous chondrite in blue, Earth's crust in orange.

są chondryty węgliste w tul. Zawartość Tm w chondrytach grupy CV stanowi 0,1077 zawartości tego metalu w skorupie ziemskiej.

Na rysunku 10 przedstawiono zawartość La jako przykładowego metalu ziem rzadkich w chondrytach węglistych w odniesieniu do zawartości tego metalu w skorupie ziemskiej.

Metale, które zostały objęte analizą mogą występować w różnorodnych minerałach. Żelazo jest metalem, który występuje powszechnie niemal we wszystkich minerałach obecnych w chondrytach. Jest ono składnikiem krzemianów, siar-

czków, a także stopów metalicznych. Najcenniejszym źródłem żelaza mogą być właśnie stopy FeNi, w tym kamacyt, taenit, tetrataenit, plessyt oraz awaruit. Dodatkowo składnikami tych stopów są także nikiel, kobalt oraz miedź. Potencjalne znaczenie złożowe będą mogły mieć także siarczki, takie jak pentlandyt czy mackinawit oraz występujące niekiedy siarczki bogate w kobalt. Złoto, platynę, srebro, ale także miedź można zaobserwować w bardzo drobnych ziarnach stopów metalicznych. Chrom jest głównym składnikiem chromitu, zaś pierwiastki ziem rzadkich zaobserwować można w występujących w chondrytach węglistych fosforanach (Rubin 1997). Warto podkreślić jednak, że analiza składu chemicznego faz mineralnych, jak i udziału poszczególnych faz mineralnych w całej objętości meteorytów czy też ich ciał macierzystych będzie przedmiotem dalszych badań, dla których ta publikacja jest wstępem.

Podsumowanie i wnioski

Przyszłość rozwoju cywilizacji jest ściśle związana z pozyskiwaniem surowców oraz ich przetwarzaniem. Także poza Ziemią obecność naszej cywilizacji wymaga zaspokojenia potrzeb na surowce, w tym surowce metaliczne niezbędne do budowy narzędzi, maszyn, urządzeń, pojazdów oraz pomieszczeń baz i osiedli. W zależności od miejsca, w którym pojawi się zapotrzebowanie na dane surowce, różne mogą być źródła ich pozyskiwania. Ciała macierzyste chondrytów węglistych stanowią około 75% wszystkich znanych planetoid w pasie planetoid i występują przede wszystkim w jego zewnętrznej części. Właśnie tam, na zewnętrznych obrzeżach pasa planetoid surowce te mogą mieć swoje potencjalne zastosowanie i w związku z tym mogą być tam pozyskiwane metodami górniczymi.

Na podstawie przeprowadzonej analizy metadanych autorzy wykazali, że ciała macierzyste chondrytów węglistych można w całości uznać za złoża żelaza oraz niklu stosując obecne kryteria charakteryzujące ziemskie złoża tych dwóch metali. Ponadto ciała macierzyste chondrytów węglistych są wzbogacone względem średniej zawartości metali w skorupie ziemskiej w: chrom, kobalt, miedź, złoto, platynę, pallad oraz srebro. Wykazano także znaczne zubożenie chondrytów węglistych w metale ziem rzadkich względem składu skorupy ziemskiej.

Mimo że ciała macierzyste chondrytów węglistych nie wydają się być szczególnie interesującym obiektem potencjalnej eksploatacji górniczej, na uwagę może jednak należeć, że niniejsza publikacja rozważa jedynie wielkość potencjalnych zasobów geologicznych tych planetoid. Na opłacalność eksploatacji danego złoża ma wpływ bardzo wiele czynników, w tym koszty transportu, wykorzystywana technologia, budowa złoża (planetoida o strukturze rubble pile), obecność kopaliny towarzyszących i wiele innych. Jedną z najistotniejszych kopaliny towarzyszących, jakie występują prawdopodobnie na planetoidach typu C może być lód wodny (Vernazza i in. 2017). W takiej sytuacji eksploatacja kilku kopaliny jednocześnie miałaby zupełnie inne kryteria bilansowości – opłacalności eksploatacji.

Chondryty węgliste grupy CI charakteryzują się największą zawartością srebra (199 ppb) spośród wszystkich grup chondrytów węglistych. Chondryty grupy CM

charakteryzują się największą zawartością miedzi (141 ppm). Chondryty grupy CV charakteryzują się największą zawartością większości metali ziem rzadkich: lantanu (564 ppb), ceru (1348 ppb), prazeodymu (216 ppb), neodymu (1063 ppb), samaru (324 ppb), europu (118 ppb), gadolinu (436 ppb), erbu (312 ppb), tulu (56 ppb), iterbu (322 ppb) oraz lutetu (51 ppb). Chondryty grupy CK charakteryzują się największą zawartością terbu (92 ppb), dysprozu (555 ppb), holmu (136 ppb) oraz itru (3200 ppb). Chondryty grupy CR charakteryzują się z kolei największą zawartością chromu (0,36%). Chondryty grupy CB charakteryzują się największą zawartością żelaza (73,15%), niklu (4,36%), kobaltu (1812 ppm), złota (278 ppb), platyny (4500 ppm) oraz palladu (1430 ppb).

Można stwierdzić, że mimo występowania praktycznie tylko Fe i Ni w koncentracjach złożowych według dzisiejszych ziemskich kryteriów bilansowości złóż (opłacalności eksploatacji) na ciałach macierzystych chondrytów węglistych, to jednak liczba tych ciał pozwala traktować te asteroidy jako potencjalne złoża nadające się do eksploatacji metali. Opłacalność eksploatacji górniczej na planetoidach typu C zwiększa także liczba kopalin towarzyszących, a więc innych metali, głównie Cr, Co, Cu, Au, Pt, Pd, Ag, a przede wszystkim lodu wodnego. Przemawia za tym również ich położenie w stosunkowo niedużej odległości od księżyców Jowisza i Saturna, które prawdopodobnie będą kolejnymi celami naszych badawczych misji kosmicznych, a być może także celami osiedlania się na nich człowieka.

Podziękowania

W artykule wykorzystano część wyników badań zrealizowanych w ramach pracy inżynierskiej Joanny Gruchot, wykonywanych pod opieką naukową Tadeusza Przylibskiego na Wydziale Geoinżynierii, Górniczo-Geologii Politechniki Wrocławskiej. Autorzy pragną wyrazić także podziękowania Recenzentom: Panu Profesorowi Łukaszowi Karwowskiemu oraz Panu Doktorowi Tomaszowi Jakubowskiemu za cenne sugestie uzupełnień tekstu i wprowadzenia ważnych korekt i poprawek.

Literatura

- Anders E., Grevesse N., 1989, *Abundances of the elements: Meteoritic and solar*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(1), s. 197–214. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X)
- Craig J.R., Vaughan D.J., Skinner B.J., 2003, *Zasoby Ziemi*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Gaffey M.J., Burbine T.H., Binzel R.P., 1993, *Asteroid spectroscopy: Progress and perspectives*. Meteoritics, 28, s. 161–187. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1993.tb00755.x>
- Hutchison R., 2006, *Meteorites. A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Koblitz J., 2010, *MetBase*® ver. 7.3. Meteorite Data Retrieval Software. Ritterhude, Germany.
- Łuszczek K., 2021, *Chondryty zwyczajne i ich ciała macierzyste*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- 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 Ch., Kleine T., 2021,

- The Loongana (CL) group of carbonaceous chondrites*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 304, s. 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.04.007>
- Nesvorný D., Bottke W., Vokrouhlický B., Morbidelli A., Jedicke R., 2005, *Asteroid Families. Asteroids, Comets, Meteors Proceedings IAU Symposium No. 229*, 2005.
- Nieć M. (red.), 1994, *Kryteria bilansowości złóż kopalin*, Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, pod redakcją M. Niecia, Komisja Zasobów Naturalnych, OIKOS, Warszawa.
- Pilorget C., Okada T., Hamm V., Brunetto R., Yada T., Loizeau D., Riu L., Usui T., Moussi-Soffys A., Hatakeda K., Nakato A., Yogata K., Abe M., Aléon-Toppani A., Carter J., Chaigneau M., Crane B., Gondet B., Kumagai K., Langevin Y., Lantz C., Le Pivert-Jolivet T., Lequertier G., Lourit L., Miyazaki A., Nishimura M., Poulet F., Arakawa M., Hirata N., Kitazato K., Nakazawa S., Namiki N., Saiki T., Sugita S., Tachibana S., Tanaka S., Yoshikawa M., Tsuda Y., Watanabe S., Bibring J.-P., 2021, *First compositional analysis of Ryugu samples by the MicrOmega hyperspectral microscope*. *Nature Astronomy*. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01549-z>
- Sears D.W.G., 2004, *The origin of chondrules and chondrites*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Szlachetko J.H., 2021, *Sprawozdanie z I Konsyliencyjnej Konferencji Kosmicznej, Gdańsk, 26-28 listopada 2021 r.*, *Ad Astra*, 2, s. 44–49. http://adastra.im.edu.pl/wp-content/uploads/2022/01/Ad-Astra_Nr2_2021_Szlachetko_sprawozdanie.pdf
- Vernazza P., Castillo-Rogez J., Beck P., Emery J., Brunetto R., Delbo M., Marsset M., Marchis F., Groussin O., Zanda B., Lamy P., Jorda L., Mousis O., Delsanti A., Djouadi Z., Dionnet Z., Borondics F., Carry B., 2017, *Different Origins or different evolutions? Decoding the spectra diversity among C-type asteroids*, *The Astronomical Journal*, 153, 72.
- Yada T., Abe M., Okada T., Nakato A., Yogata K., Miyazaki A., Hatakeda K., Kumagai K., Nishimura M., Hitomi Y., Soejima H., Yoshitake M., Iwamae A., Furuya S., Uesugi M., Karouji Y., Usui T., Hayashi T., Yamamoto D., Fukai R., Sugita S., Cho Y., Yumoto K., Yabe Y., Bibring J.-P., Pilorget C., Hamm V., Brunetto R., Riu L., Lourit L., Loizeau D., Lequertier G., Moussi-Soffys A., Tachibana S., Sawada H., Okazaki R., Takano Y., Sakamoto K., Miura Y.N., Yano H., Ireland T.R., Yamada T., Fujimoto M., Kitazato K., Namiki N., Arakawa M., Hirata N., Yurimoto H., Nakamura T., Noguchi T., Yabuta H., Naraoka H., Ito M., Nakamura E., Uesugi K., Kobayashi K., Michikami T., Kikuchi H., Hirata N., Ishihara Y., Matsumoto K., Noda H., Noguchi R., Shimaki Y., Shirai K., Ogawa K., Wada K., Senshu H., Yamamoto Y., Morota T., Honda R., Honda C., Yokota Y., Matsuoka M., Sakatani N., Tatsumi E., Miura A., Yamada M., Fujii A., Hirose C., Hosoda S., Ikeda H., Iwata T., Kikuchi S., Mimasu Y., Mori O., Ogawa N., Ono G., Shimada T., Soldini S., Takahashi T., Takei Y., Takeuchi H., Tsukizaki R., Yoshikawa K., Terui F., Nakazawa S., Tanaka S., Saiki T., Yoshikawa M., Watanabe S., Tsuda Y., 2021, *Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu*. *Nature Astronomy*. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01550-6>
- www.foxbusiness.com/money/space-travel-what-it-costs-to-leave-earth (13.11.2020)
- Minor Planet Center, 2022 – The International Astronomical Union, Minor Planet Center: http://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=162173 (6.01.2022)