

Tadeusz A. PRZYLIBSKI¹, Konrad BLUTSTEIN¹, Mateusz SZCZĘŚNIEWICZ¹,
Katarzyna ŁUSZCZEK¹

Pierwsza tona Księżyca na Ziemi

The first ton of the Moon on Earth

Abstract: The authors drew attention to the classification in December 2022 of over one ton of lunar meteorites that fell to Earth. They have been found since the early 1960s, but their first classification, as lunar meteorites, was made only in 1982. This was possible thanks to more advanced geochemical research and the possibility of comparing their results with the results of analyzes of samples of rocks and lunar regolith brought by the Soviet missions of the Luna program, and above all by several American missions of the Apollo program. With access to over 1.4 tons of lunar rocks on Earth, we are now able to conduct multidisciplinary studies of the lunar geology. Their results are particularly important in the context of building human settlements or lunar bases for further exploration of the solar system. This applies to both the physical properties of these rocks, as well as their chemical and mineral composition in the context of the presence of deposits of various mineral resources. It should be emphasized that meteoritic material from the Moon has been increasing in terrestrial collections (especially scientific ones) very quickly since 2015. This is the result of extensive exploration work, primarily in Antarctica, Africa, the Arabian Peninsula and Australia.

Among the identified rocks reaching the Earth in the form of lunar meteorites, the most numerous are feldspar breccias (impact metamorphic rocks), anorthosites (plutonic igneous rocks building highlands areas of the silver globe) and basalts (extrusive igneous rocks building areas of the lunar maria). In addition, there are other igneous mafic rocks, such as gabbro, norite, troctolite and others. The surface of the crust is covered with regolith composed of fragments of the above-mentioned igneous rocks and breccias subjected to fragmentation by successive collisions with meteorites and micrometeorites and the action of solar wind particles (space weathering). As a result of these processes, the surface of the Moon is covered with a layer of loose sedimentary rock with a thickness of a few to several meters. Locally, a regolith may be a compact clastic sedimentary rock if a significant number of rock fragments are welded together with the glaze produced during collisions with micrometeorites.

The authors also briefly presented the genesis and evolution as well as the geological structure of the Moon based on the results of the latest geophysical and geochemical (including isotopic) as well as mineralogical and petrological research. They pointed out that the proposed model of the genesis of the Moon from synestia formed after the collision of the proto-Earth with another

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: Tadeusz.Przylibski@pwr.edu.pl, Konrad.Blutstein@pwr.edu.pl, Mateusz.Szczesniewicz@pwr.edu.pl, Katarzyna.Luszczek@pwr.edu.pl*

hypothetical planetary embryo called Theia, explains well the chemical and isotopic homogeneity of the Earth and the Moon. The authors also pointed out that due to the common genesis, lunar meteorites are classified and named in the same way as terrestrial rocks, which definitely distinguishes them from other meteorites. The exceptions are Martian and HED meteorites, which are classified similarly to terrestrial rocks, although their names often do not have equivalents in the classification of terrestrial rocks (e.g. SNC meteorites). Tracking data on officially classified lunar meteorites, the authors found that in December 2022, the total mass of meteoritic matter considered to coming from the Moon exceeded 1 ton. Lunar meteorites are currently the largest source of information about the geology of the Silver Globe, accounting for almost two-thirds of the mass of lunar material available for study on Earth.

Keywords: The Moon, lunar meteorite, basalt, anorthosite, feldspathic breccia

Wstęp

Niemal przez całą historię naszej cywilizacji badania naukowe dotyczące Księżyca były domeną astronomii i astronomów. Dopiero w latach sześćdziesiątych XX wieku badania naszego naturalnego satelity mogły stać się w pełni multidyscyplinarne. Stało się to możliwe dzięki przywiezieniu przez misję Apollo 11 pierwszych próbek skał i regolitu księżycowego. Dowodzona przez Neila Armstronga misja rozpoczęła się 16 lipca 1969 roku, a powrót z pierwszymi próbkami geologicznymi Księżyca na Ziemię nastąpił 24 lipca 1969 roku. Równoległe trwały radzieckie misje Łuna. Pierwsze próbki gruntu księżycowego przywiozła bezzałogowa misja Łuna 16. Rozpoczęła się ona 12 września 1970 roku, a zakończyła 24 września 1970 roku. Misje Apollo i Łuna rozpoczęły multidyscyplinarne badania naszego naturalnego satelity.

Meteorityt księżycowe

Badania skał i minerałów księżycowych możliwe są nie tylko dzięki próbkom dostarczonym przez kolejne misje Apollo, Łuna, czy ostatnio Chang'e, ale także dzięki księżycowym meteorytom trafiającym na naszą planetę. Wprawdzie najstarszy znany meteoryt księżycowy (o jakim obecnie wiemy), został znaleziony na Ziemi w 1960 roku, a więc przed rozpoczęciem misji Apollo i Łuna, jednak został on sklasyfikowany dopiero w 1991 roku. Jest to Calalong Creek o masie 19 g, znaleziony w zachodniej Australii. Sklasyfikowano go jako anortozyt księżycowy. Natomiast najwcześniej sklasyfikowanym meteoritem księżycowym jest Allan Hills 81005 (ALH 81005) o masie 31,4 g. Znaleziono go w Antarktyce w 1981 lub 1982 roku. Został on sklasyfikowany jako anortozyt w 1982 roku. Kilka innych meteorytów najwcześniej znalezionych i zidentyfikowanych jako księżycowe, to także meteority reprezentujące materiał anortozytowy, a więc pochodzący z wyżyn księżycowych (rys. 1). Wśród tych najwcześniej zidentyfikowanych warto wymienić takie meteority, jak: sparowane MacAlpine Hills 88105 i 88104 (znalezione w Antarktyce w 1988 roku meteority o masach 663 g i 61,2 g, sklasyfikowane w 1989 roku), Yamato 791197 (znaleziony w Antarktyce w 1979 roku meteoryt o masie 52,4 g, ale sklasyfikowany dopiero w 1998 roku), Queen

Alexandra Range 93069 (QUE 93069; znaleziony również w Antarktyce w 1993 roku meteoryt o masie 21,4 g, sklasyfikowany w 1994 roku), a także Dar al Gani 262 (DaG 262; znaleziony w 1997 roku w Libii i sklasyfikowany w tym samym roku meteoryt o masie 513 g). Natomiast najstarszym zidentyfikowanym bazaltem pochodzącym z Księżyca jest meteoryt Elephant Moraine 87521 (EET 87521). Jest to meteoryt znaleziony na Antarktydzie w 1987 roku, jego masa wynosi 30,7 g, a sklasyfikowano go oficjalnie w 1990 roku (MetBull 2022). Zatem już pierwsze okazy meteorytów księżycowych (lunaitów) sugerowały, że najczęstszym materiałem skalnym, jaki trafia na Ziemię z Księżyca są magmowe skały głębinowe – anortozyty oraz również magmowe skały, ale tym razem wylewne – bazalty (rys. 2 i 3). Można je było porównywać z próbkami przywiezionymi przez misje Apollo i Łuna, aby na tej podstawie zgłębiać geologię Księżyca (przez krótki czas nazywaną selenologią).

Od początku XXI wieku nastąpił bardzo szybki przyrost danych o budowie geologicznej naszego naturalnego satelity. Z jednej strony dostarczają ich satelity krążące wokół Księżyca (np. amerykański Lunar Reconnaissance Orbiter, czy indyjski Chandrayaan-2) i ponownie próbki pobierane z jego powierzchni (chińska misja Chang'e 5, której wykonanym zadaniem było pobranie i dostarczenie na Ziemię próbek regolitu Księżyca) (Lin i in. 2020; Li i in. 2022a, b; Zhang i in. 2022), a z drugiej analizy materiału skalnego, który w coraz większej ilości i masie znajdujący jest na zimnych, a przede wszystkim gorących pustyniach (tab. 1



Rys. 1. Powierzchnia płytki typowego anortozytu księżycowego. Widoczne są dominujące w składzie plagioklasy (anortyty) oraz niewielka ilość minerałów ciemnych. Meteoryt Gadamis 004 z kolekcji Marcina Cimały (fotografia za zgodą właściciela).

Fig. 1. Plate surface of a typical lunar anorthosite. Plagioclase (anorthite) and a small amount of dark minerals are visible. Meteorite Gadamis 004 from the collection of Marcin Cimała (photograph with the consent of the owner).



Rys. 2. Powierzchnia płytki brekcji bazaltowo-gabrowej. Meteoryt El Hareicha 001 z kolekcji Marcina Cimały (fotografia za zgodą właściciela).

Fig. 2. The surface of the basalt-gabbro breccia plate. The El Hareicha 001 meteorite from the collection of Marcin Cimała (photograph courtesy of the owner).



Rys. 3. Całkowity okaz meteorytu Dho 1629 z kolekcji Marka Woźniaka sklasyfikowany jako bazalt/anortozyt. Jest brekcją regolitową, która zawiera materiał anortozytowy i bazaltowy (fotografia za zgodą właściciela).

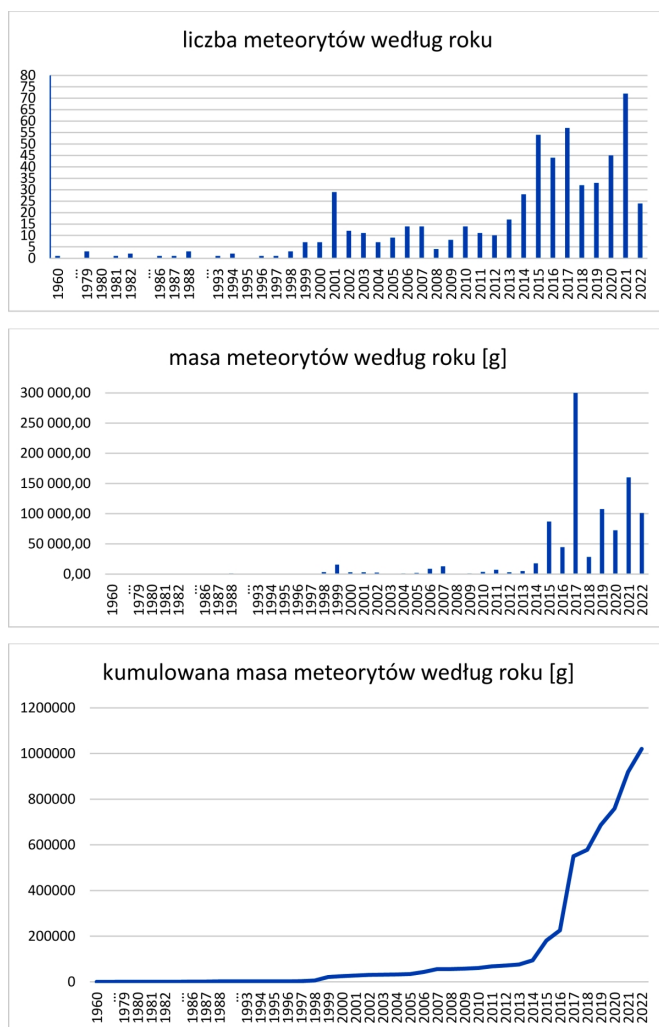
Fig. 3. A complete specimen of the Dho 1629 meteorite from Marek Woźniak's collection classified as basalt/anorthosite. It is a regolithic breccia containing anorthosite and basaltic material (photograph courtesy of the owner).

Tabela 1. Zestawienie liczby oraz masy meteorytów księżycowych według roku ich spadku, odnalezienia lub klasyfikacji (na podstawie MetBull 2022).

Table 1. A list of the number and mass of lunar meteorites by year of their fall, finding or classification (based on MetBull 2022).

Rok spadku/znalezienia/klasyfikacji	Liczba [-]	Masa [g]
1960	1	19,0
1979	3	67,2
1981	1	31,4
1982	2	63,7
1986	1	648,0
1987	1	30,7
1988	3	1 166,2
1993	1	21,4
1994	2	26,6
1996	1	53,0
1997	1	513,0
1998	3	3 425,8
1999	7	15 662,3
2000	7	2 979,6
2001	29	2 858,6
2002	12	2 606,5
2003	11	795,2
2004	7	1 094,9
2005	9	1 999,1
2006	14	8 793,9
2007	14	12 827,6
2008	4	567,9
2009	8	1 167,2
2010	14	3 482,4
2011	11	7 023,8
2012	10	3 068,0
2013	17	5 093,3
2014	28	17 856,6
2015	54	87 154,1
2016	44	44 609,7
2017	57	324 702,2
2018	32	28 319,7
2019	33	107 754,4
2020	45	72 703,3
2021	72	159 931,2
2022	24	101 190,6
SUMA	583	1 020 308,1

i rys. 4). Meteoryty księżycowe odnajdywane są na lodowych pustyniach Antarktydy (44 znaleziska) oraz gorących pustyniach Afryki, Australii i Półwyspu Arabskiego (539 znalezisk). Warto odnotować, że obecnie (grudzień 2022 roku) dysponujemy na Ziemi około 383,777 kilogramami próbek regolitu (gruntu) i skał przywiezionych przez misje księżycowe i znacznie większą masą skał, które z powierzchni Księżyca zostały wyrwane w czasie zderzeń z asteroidami i meteoroidami, aby następnie trafić na powierzchnię Ziemi w postaci meteorytów księżycowych (tab. 2 i 3). Największym z księżycowych meteorytów dotychczas znalezionych na Ziemi jest Northwest Africa 12691, odnaleziony w 2017 roku, którego masa wynosi 103 770 g. Został on sklasyfikowany jako księżycowa brekcja



Rys. 4. Liczba próbek i masa oraz krzywa kumulacyjna reprezentująca przyrost masy znajdujących na Ziemi i sklasyfikowanych meteorytów księżycowych (na podstawie MetBull 2022).

Fig. 4. Number of samples and mass, and a cumulative curve representing the mass gain of Earth-found and classified lunar meteorites (based on MetBull 2022).

skaleniowa w 2020 roku (MetBull 2022). Brekcje skaleniowe są najczęściej identyfikowaną i klasyfikowaną oraz reprezentowaną w kolekcjach skał księżycową (rys. 5).

Dzięki tym znaleziskom już w grudniu 2022 roku mogliśmy świętować zgromadzenie łącznie pierwszej tony meteorytowej materii księżycowej, która samodzielnie przybyła na Ziemię. Dzięki meteorytom księżycowym posiadanym w tak dużej masie i liczbie różnorodnych próbek możemy studiować na Ziemi budowę geologiczną Księżyca i poznawać jego zasoby mineralne. Wiedza ta wspomagana danymi z satelitów orbitujących wokół Srebrnego Globu pozwala uzyskać coraz bardziej spójny i kompletny obraz budowy geologicznej Księżyca i jego zasobów surowcowych.

Meteoryty księżycowe znajdują się także w różnych kolekcjach w Polsce. Przede wszystkim są to kolekcje prywatne. Największe i najciekawsze kolekcje zawierające różne meteoryty księżycowe należą do Marcina Cimały, Tomasza Jakubowskiego, Tomasza Kubalczaka, Kazimierza Mazurka, Andrzeja S. Pilskiego, Marcina Stolarza, Iwo Szklarskiego, Marka Woźniaka i zapewne jeszcze kilku innych osób. W instytucjach muzealnych znajdują się zwykle pojedyncze, niewielkie okazy o wadze kilku gramów. Wśród tych kolekcji można wymienić kolekcję Muzeum



Rys. 5. Księżycowe brekcje skaleniowe. Po lewej u góry meteoryt NWA 13638 z kolekcji Marcina Cimały, po prawej u góry meteoryt NWA 10172 z kolekcji Tomasza Jakubowskiego, u dołu meteoryt NWA 11421 z kolekcji Tomasza Jakubowskiego (wszystkie fotografie za zgodą właścicieli).

Fig. 5. Lunar feldspar breccias. On the top left the meteorite NWA 13638 from the collection of Marcin Cimała, on the top right the meteorite NWA 10172 from the collection of Tomasz Jakubowski, at the bottom the meteorite NWA 11421 from the collection of Tomasz Jakubowski (all photos with the consent of the owners).

Tabela 2. Zestawienie mas skał księżycowych dostępnych do badań na Ziemi (Orloff 2004; Hu i in. 2021; Bell i in. 2022; MetBull 2022).

Table 2. A list of lunar rock masses available for study on Earth (Orloff 2004; Hu et al. 2021; Bell et al. 2022; MetBull 2022).

Skały księżycowe	Masa [g]	Procent masy całkowitej
meteoryty	1 020 308	72,67
program Apollo	381 720	27,19
program Luna	326	0,02
misja Chang'e	1 731	0,12
SUMA	1 404 085	100,00

Tabela 3. Liczba okazów i masa meteorytów reprezentujących skały Księżyca zidentyfikowane i sklasyfikowane oraz dostępne do badań na Ziemi (na podstawie MetBull 2022).

Table 3. Number of specimens and mass of meteorites representing lunar rocks identified and classified and available for study on Earth (based on MetBull 2022).

Typ	Liczba	Masa [g]
brekcja skaleniowa	289	681 733,6
<i>nieokreślony</i>	100	61 353,3
anortozyt	79	77 217,9
brekcja fragmentaryczna	26	109 378,5
bazalt	24	22 014,7
brekcja bazaltowa	20	5 179,9
brekcja ze stopionym materiałem tworzącym matrix	16	36 651,0
gabro	11	13 415,1
anortozyt troktolityczny	5	7 816,7
bazalt/anortozyt	3	62,2
troktolit	3	132,3
brekcja bazaltowo-gabrowa	2	556,2
przetopiona skała pochodząca z troktolitu	2	456,7
noryt	1	633,0
gabro oliwinowe	1	2 440,0
gabronoryt oliwinowy	1	1 267,0
SUMA	583	1 020 308,1

Ziemi PAN w Warszawie, gdzie znajduje się mały okaz brekcji skaleniowej – fragment meteorytu Shisr 162, kolekcję Muzeum Mineralogicznego Uniwersytetu Wrocławskiego, gdzie znajduje się płytka DaG 400, która jest fragmentem księżycowego anortozytu. Niewielkie okazy tego ostatniego meteorytu znajdują się także w zbiorach Muzeum Ziemi na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Sosnowcu oraz w Olsztyńskim Planetarium i Obserwatorium Astronomicznym w Olsztynie. Możemy szacować, że łącznie w Polsce znajduje się obecnie około 10 kg skał księżycowych.

Interesujący jest też wiek meteoroidów księżycowych, których kosztem tworzą się ziemskie lunaity. Jest to tzw. czas ekspozycji na promieniowanie kosmiczne (ang. *cosmic ray exposure age*), a więc czas jaki upływa od wybicia skały z powierzchni Księżyca do jej spadku na powierzchnię Ziemi. Prędkość ucieczki skał wybijanych przez uderzenia meteoroidów i planetoid w powierzchnię Księżyca wynosi 2,4 km/s. Oszacowano, że około 97% skał wyrzuconych z powierzchni Księżyca z prędkością do 3,2 km/s w ciągu mniej niż miliona lat spada na powierzchnię Ziemi (Gladman i in. 1995). Jednocześnie bardzo niewielka liczba skał jest wyrzucana z powierzchni Srebrnego Globu z prędkością większą od 3,2 km/s (Gladman i in. 1996). Większość znajdujących na Ziemi meteorytów księżycowych zostało wyrzuconych z powierzchni Księżyca przez zderzenia, których efektem było powstanie kraterów o średnicy mniejszej od 10 km (Warren 1994). Na podstawie analizy czasu wyrzutu materii skalnej, którą obecnie posiadamy na Ziemi jako meteoryty księżycowe ustalono, że zderzenia produkujące tę materię meteorytową na powierzchni Księżyca miały miejsce co najmniej trzykrotnie na obszarach wyżyn oraz pięciokrotnie na obszarach mórz księżycowych (Eugster i in. 2006). Udało się ustalić, że bazalty mórz księżycowych oraz skały z pogranicza mórz i wyżyn księżycowych były wyrzucane z powierzchni Srebrnego Globu mniej niż 40 tysięcy lat temu, od 50 do 110 tysięcy lat temu, od 350 do 100 tysięcy lat temu, a także $1,0 \pm 0,2$ i 3 ± 1 miliony lat temu. Natomiast brekcje z obszarów wyżyn mają wiek wyrzutu z powierzchni Księżyca rzędu 60 tysięcy lat, około 250–300 tysięcy lat oraz 8 ± 3 miliona lat (Eugster i in. 2006). Z przedstawionych danych wynika, że mimo iż dotychczas nie zaobserwowano na Ziemi spadku meteorytu księżycowego, to w przestrzeni kosmicznej znajdują się prawdopodobnie meteoroidy będące wyrzuconymi z powierzchni Srebrnego Globu skałami, które mogą dostarczyć księżycowe meteoryty na Ziemię w najbliższym czasie.

Zarys budowy geologicznej Księżyca

Księżyc, podobnie jak Ziemia, zbudowany jest z trzech ułożonych koncentrycznie sfer. Są to od zewnątrz: skorupa, płaszcz i jądro. Leżąca najbardziej na zewnątrz skorupa ma średnio 49 ± 16 km miąższości. Jest ona grubsza po stronie niewidocznej i cieńsza po stronie widocznej, co powoduje, że środek masy jest przesunięty względem środka geometrycznego Księżyca. Dane geofizyczne wskazują, że jądro złożone jest ze stałego jądra wewnętrznego i płynnego jądra zewnętrznego (Jaumann i in. 2012).

Tworząca zewnętrzną sferę skorupa księżycowa składa się z czterech głównych typów skał pod względem zróżnicowania geochemicznego oraz będących wynikiem mechanicznego niszczenia i mieszania składników mineralnych. Skałami tymi są (Taylor i McLennan 2010; Jaumann i in. 2012):

- skały magmowe głębinowe budujące obszary wyżynne złożone z bogatych w żelazo anortozytów, troktolitów, norytów, gabronorytów i dunitów;
- bazaltowe skały wulkaniczne wzbogacone w FeO i TiO₂ i zubożone w Al₂O₃ tworzące obszary mórz księżycowych;

- polimiktyczne brekcje klastyczne powstałe w wyniku jednego lub wielu uderzeń meteoroidów i asteroid w powierzchnię Księżyca tworzące mieszaninę różnych typów skał;
- regolit – luźna (lokalnie zwięzła) skała okruczowa utworzona na skutek rozdrabniania skał skorupy przez uderzenia, zwłaszcza drobnych meteoroidów i mikrometeoroidów, poddawana działaniu procesów wietrzenia kosmicznego.

Powierzchnię skorupy księżycowej stanowi nieskonsolidowana warstwa drobnopięknotego gruzu zwana regolitem, który zawiera fragmenty skał krystalicznych i minerałów połączone ze sobą szklivem produkowanym w czasie uderzeń mikrometeoroidów (Jaumann i in. 2012). W formowaniu powierzchni Księżyca biorą udział cztery główne procesy: zderzenia z obiektami kosmicznymi (impakty), wulkanizm, tektonika oraz wietrzenie kosmiczne wywołane oddziaływaniem na powierzchnię skał cząstek wiatru słonecznego (Lucey i in. 2006; Taylor i McLennan 2010; Jaumann i in. 2012; Kallio i in. 2019).

Zarys najważniejszych wydarzeń w kształtowaniu budowy geologicznej Księżyca w odniesieniu do uproszczonego podziału dziejów Ziemi przedstawia tabela 4. Na podstawie tego porównania możemy m.in. przekonać się jak dynamicznym procesem jest cały rozwój zwierząt na Ziemi, który trwa mniej więcej tyle ile najmłodszy okres rozwoju Księżyca – okres kopernikański (*Copernican*). Jednocześnie porównanie tabel stratygraficznych Księżyca i Ziemi pokazuje dobitnie jak mało wciąż wiemy o geologii i historii rozwoju naszego naturalnego satelity – im dokładniejszy, bardziej szczegółowy podział stratygraficzny, tym więcej dostępnych jest informacji o poszczególnych okresach rozwoju. Gdyby do ziemskiej części tabeli 4 próbować dodać szczegółowy podział Fanerozoiku, to w przyjętej skali nie byłoby możliwe jego czytelne przedstawienie.

Skały księżycowe dostępne do badań na Ziemi

Na podstawie obserwacji i badań znajdujących na Ziemi meteoroidów księżycowych możemy stwierdzić, że są to skały bardzo podobne wyglądem, strukturą i składem mineralnym oraz chemicznym (i izotopowym) do skał budujących Ziemię. Tak duże podobieństwo wynika ze wspólnej genezy Ziemi i Księżyca. Powstanie naszego naturalnego satelity było związane ze zderzeniem proto-Ziemi z embriosem innej planety – obiektem nazywanym Theia – o wielkości współczesnego Marsa około 4,5–4,4 miliarda lat temu (Lock i in. 2018). Miało to miejsce w późnym okresie wczesnego etapu formowania się planet wewnętrznych Układu Słonecznego. Według ostatnio zaproponowanego modelu po niecentralnym (ukośnym) zderzeniu Thei z Ziemią utworzyła się synestia, która jest nowym typem struktury planetarnej. Ma kształt pączka (ang. *doughnut*), który ma większą miąższość na zewnątrz, niż wewnątrz i składa się z odparowanej materii po zderzeniu. Chłodzenie synestii napędzało mieszanie materii obu ciał biorących udział w zderzeniu, a kondensacja generowała tworzenie się i wzrastanie księżyców orbitujących w obrębie synestii. Dzięki temu materia Ziemi i Księżyca była niemal jednorodna pod względem składu chemicznego i izotopowego. Księżyc, jak

Tabela 4. Tabela stratygraficzna Księżyca (według Ji i in. 2022) w odniesieniu do uproszczonej tabeli stratygraficznej Ziemi (według IUGS 2022).**Table 4.** The Moon stratigraphic chart (according to Ji et al. 2022) in relation to simplified Earth chronostratigraphic chart (according to IUGS 2022).

KSIĘŻYC					ZIEMIA			
Eon	Okres	Wiek [mld lat]	Jednostki stratygraficzne	Wydarzenia geologiczne	Super Eon	Eon	Era	Wiek [mld lat]
Paleo lunarian	Copernician	0,80	Materiał kraterowy	Uderzenia tworzące kraterę (Copernicus, Tycho, Aristarchus, Kepler)	Prekambr	Fanerozoik	Kenozoik	0,06
							Mezozoik	0,25
	Paleozoik	0,54						
	Eratosteanian	3,16	Materiał kraterowy, bazalty móż księżycowych	Incydenty impaktowe i kraterowe tworzące wyraźną morfologię, ale tekstury promieniste są ledwie rozpoznawalne. Drobne erupcje powodujące powstanie bazaltów o dużej zawartości Ti, tworzących morza księżycowe		Proterozoik	Neo-proterozoik	1,00
							Mezo-proterozoik	1,60
							Paleo-proterozoik	2,50
Imbrian	3,85	Materiał kraterowy, formacje basenowe, bazalty móż księżycowych, materiał wulkaniczny	Późny Imbrian: incydenty impaktowe tworzące baseny (Compton, Humboldt, Iridium) i liczne kraterę. Masywne wylewy bazaltów o niskiej i średniej zawartości Ti. Wczesny Imbrian: incydenty impaktowe tworzące baseny (Antoniadi, Schrödinger, Orientale), wulkanizm	Archaik	Neo-archaik	2,80		
					Mezo-archaik	3,20		
Nectarian	3,92	Materiał kraterowy, formacje basenowe, produkty krystalizacji magmy reszkowej	Magmatyzm niezwiązany z morzami księżycowymi, wulkanizm, incydenty impaktowe tworzące 25 basenów		Paleo-archaik	3,60		
					Eo-archaik	4,00		
Aitkenian	4,3	Materiał kraterowy, formacje basenowe, produkty krystalizacji magmy reszkowej	Incydenty impaktowe, tworzące 49 basenów i liczne kraterę, wulkanizm, magmatyzm niezwiązany z morzami księżycowymi	Hadeik	4,57			

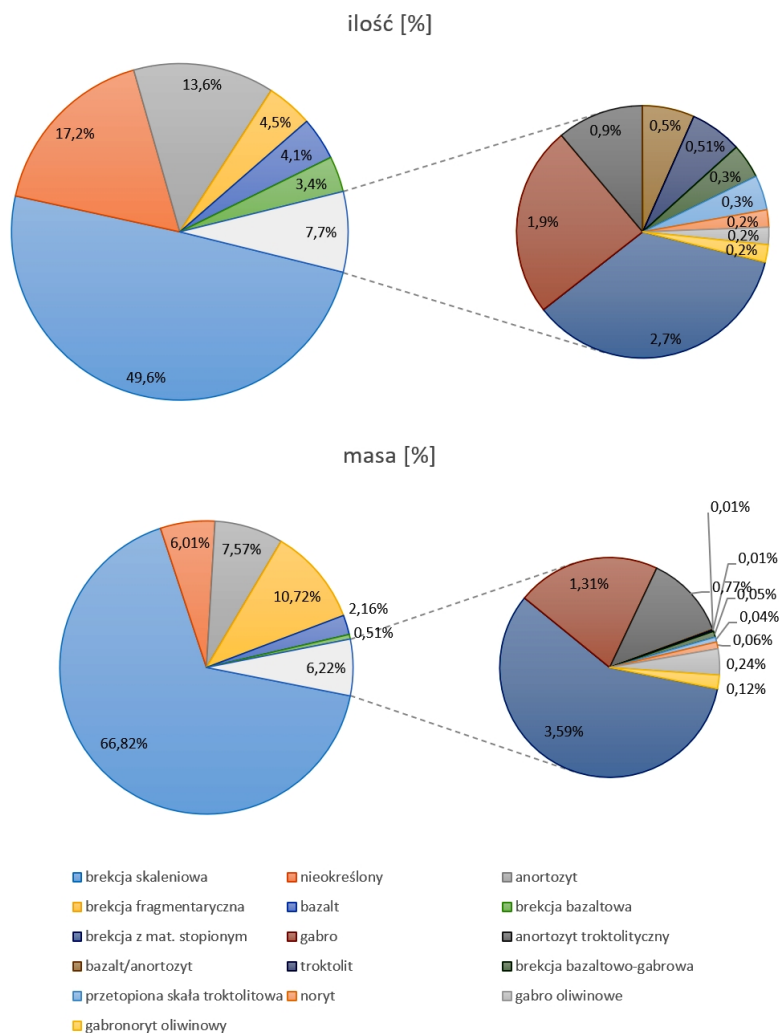
zakłada model, w ciągu około roku dzięki akrecji kondensującej materii osiągnął swoją ostateczną wielkość i masę. W ciągu kolejnych kilkudziesięciu lat ochładzająca się synestia zmniejszyła swoje rozmiary, powodując oddzielenie się Księżyca od synestii, co zakończyło główny etap akrecji księżycowej, powodując ostateczne krzepnięcie i ochłodzenie Księżyca. Pozostała część synestii stygła nadal i krzepła wewnątrz granicy Roche'a aż do utworzenia się planety, czyli Ziemi (Lock i in. 2018). Warto dodać, że granica Roche'a (lub promień Roche'a) oznacza

najmniejszą odległość satelity (księżycy) od planety, poniżej której zostałyby on rozerwany przez siły pływowe planety. W taki sposób mogą się tworzyć pierścienie wokół planet. Granica Roche'a dla Ziemi wynosi 18 470 km (<http://www2.jpl.nasa.gov/saturn/faq.html>).

Skoro skały ziemskie i księżycowe są do siebie tak podobne, to w jaki sposób można odróżnić meteoryt będący fragmentem księżycowego bazaltu od bazaltu ziemskiego? Przede wszystkim powstały one w innym czasie – będą różniły się więc one czasem krystalizacji, nazywanym też niekiedy *closure time of rock*. Księżycowe bazalty są znacznie starsze od ziemskich, ich wiek wynosi od około 4,3 do około 3,1 mld lat (Taylor i McLennan 2010). Ponadto, księżycowe skały będą znacznie wzbogacone w stosunku do ziemskich w izotopy kosmogeniczne, powstałe w wyniku oddziaływania wiatru słonecznego najpierw na skały na powierzchni Księżyca (1 model – płaszczyna, ponieważ jedna strona skały macierzystej jest ekspozowana na promieniowanie kosmiczne przed wybicciem z Księżyca), a następnie na meteoroid wybity z naszego ziemskiego satelity podczas jego podróży w przestrzeni kosmicznej na naszą planetę (2 model – bryła, w przybliżeniu do obliczeń bryła idealna, czyli kula; Leya i Masarik 2009). Mierząc stosunki izotopowe m.in. kosmogenicznych gazów szlachetnych jesteśmy w stanie określić CREA (ang. *cosmic ray exposure age*), tj. czas ekspozycji na promieniowanie kosmiczne, czyli czas przebywania meteoroidu w przestrzeni kosmicznej przed spadkiem na Ziemię w postaci meteorytu (Wieler 2002; Łuszczek i in. 2012).

Meteority księżycowe otrzymują nazwy ziemskich skał. Dzięki temu mogą one być łatwo porównywane z ziemskimi skałami, głównie magmowymi, zarówno plutonicznymi, jak i wulkanicznymi, ale także i metamorficznymi. Te ostatnie reprezentowane są przez różnego rodzaju brekcje (zderzeniowe, impaktowe) uformowane na skutek zderzeń ciał kosmicznych z powierzchnią Księżyca. Natomiast skałami osadowymi Księżyca są luźne skały okruchowe formujące regolit księżycowy, pokrywający powierzchnię Srebrnego Globu. Po częściowej diagenecie związanej z łączeniem poszczególnych okruchów tworzących regolit przez fragmenty płynnego szkliwa pozderzeniowego, możemy mówić także o częściowo zwięzłych skałach okruchowych. Wśród zidentyfikowanych meteorytów księżycowych najczęściej występują brekcje skaleniowe, anortozyty i bazalty (rys. 6).

Warto zwrócić uwagę, że ze względu na powstanie Księżyca i jego ewolucję najbardziej rozpowszechnionymi skałami w jego skorupie są magmowe anortozyty, a podrzędnie występują bazalty, które zajmują zaledwie około 17% powierzchni Księżyca. Powierzchnia skorupy przykryta jest różnego rodzaju brekcjami (Taylor i McLennan 2010). Dlatego też największa liczba meteorytów księżycowych reprezentuje brekcje i anortozyty. Być może też meteority anortozytowe są łatwiej identyfikowane jako materiał unikalny na powierzchni Ziemi. Na rysunku 7 przedstawiono klasyfikację skał magmowych (stworzone dla skał ziemskich) z zaznaczonymi polami, które reprezentują znane obecnie skały magmowe Księżyca. Należy przy tym podkreślić, że skały bogate w skalenie, np. anortozyty, brekcje skaleniowe, gabra są zubożone w pierwiastki lotne, w tym Na, dlatego też skalenie księżycowe (plagioklasy) wchodzące w skład wymienionych skał magmowych



Rys. 6. Procentowy udział masy poszczególnych typów litologicznych skał Księżyca reprezentowanych przez meteoryty, które spadły na powierzchnię Ziemi (na podstawie MetBull 2022).

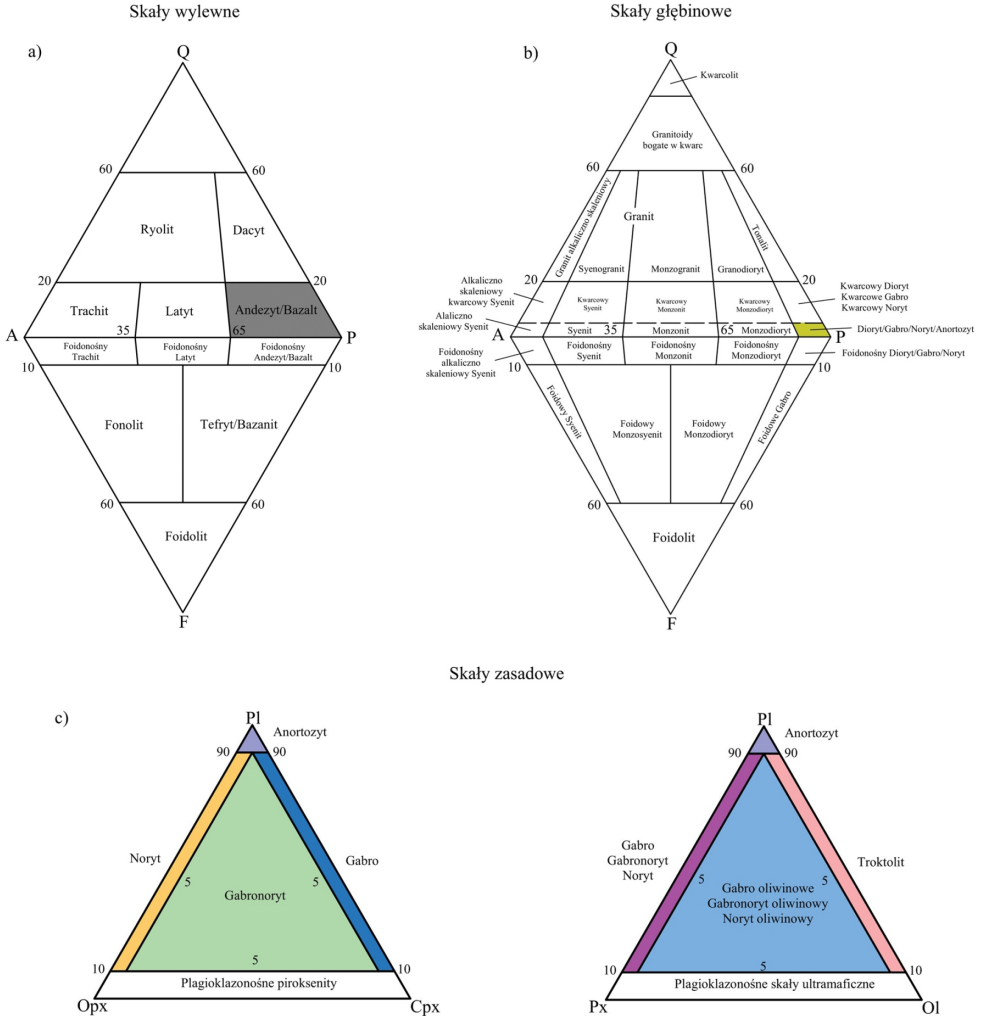
Fig. 6. Percentage of the mass of individual lithological types of rocks of the Moon represented by meteorites that fell to the Earth's surface (based on MetBull 2022).

i metamorficznych są zbudowane przede wszystkim z cząstki anortytowej ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$), bogatej w wapń, a ubogiej w sód i potas. Zubożenie Księżyca w pierwiastki lotne wiąże się z jego powstaniem w wyniku kondensacji całkowicie odparowanej materii, a następnie krystalizacji wielkiego oceanu magmy. Taka geneza ułatwiła ucieczkę pierwiastków lotnych, w które obecnie Księżyc jest wyraźnie zubożony (Taylor i McLennan 2010; Lock i in. 2018).

Podkreślić należy także występowanie wśród meteorytów księżycowych innych, poza anortozytami, skał magmowych głębinowych ubogich w krzemionkę (zasadowych), takich jak gabro, gabro oliwinowe, troktolit, noryt, czy gabronoryt. Na Ziemi skały te występują stosunkowo rzadko na powierzchni, gdyż tworzą się one

albo głęboko w skorupie ziemskiej, albo w górnej części płaszcza Ziemi. Składają się one ze skaleni – plagioklazu bogatego w Ca, tj. anortytu oraz dominujących oliwinów (gabro oliwinowe, troktolit) lub piroksenów (noryt) (por. rys. 7).

Ze wszystkich misji radzieckiego programu Łuna jedynie trzy (Łuna 16, Łuna 20 i Łuna 24) dostarczyły na Ziemię próbki pobrane z powierzchni Księżyca. Próbki zebrane podczas misji Łuna 16 pochodzą z płytkich odwiertów wykonanych na obszarze morza bazaltowego i zawierają ciemnoszary regolit. Większość próbek stanowią fragmenty bazaltu bogatego w tytan oraz glin (*high-Ti basalt*,

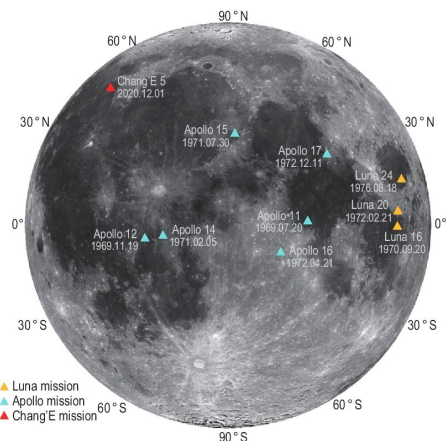


Rys. 7. Klasyfikacje IUGS: diagram QAPF skal magmowych wylewnych (wulkanicznych) – a i głębinowych (plutonicznych) – b z wyróżnionymi kolorami obszarami reprezentowanymi przez skály Księżyca zidentyfikowane w meteorytach księżycowych oraz księżycowych skal zasadowych na trójkątach: plagioklaz-oliwin-piroksen i plagioklaz-klinopiroksen-ortopiroksen – c.

Fig. 7. IUGS classifications: QAPF diagram of extrusive (volcanic) igneous rocks – a, and intrusive (plutonic) – b with colored areas represented by lunar rocks identified in lunar meteorites; and lunar basic rocks on plagioclase-olivine-pyroxene and plagioclase-clinopyroxene-orthopyroxene triangles – c.

high-Al basalt). Jednocześnie są to najuboższe w żelazo i magnez próbki bazaltu pobrane na Księżycu. Łuna 20 powróciła z próbkami anortozytowego regolitu (obszar wyżynny Księżycy), który zawierał dodatkowo fragmenty granulitów, anortozytów, polimiktyczne brekcje (brekcje anortozytowo-norytowo-troktolitowe) oraz skały stopione podczas impaktu o składzie norytowo-bazaltowym. Ostatnia misja Łuna 24 dostarczyła 170 g w większości drobnoziarnistego regolitu mórz księżycowych. Fragmenty bazaltu znajdujące się w próbce mają bardzo małą zawartość TiO_2 , MgO , a jednocześnie dużą ilość Al_2O_3 oraz FeO (Hiesinger i Head 2006; Mayer 2012).

Misja Apollo 11 powróciła na Ziemię z próbkami bazaltu o wysokiej koncentracji TiO_2 , bogatego w plagioklasy anortozytu oraz regolitu zawierającego skalenie. Astronaucci misji Apollo 12 zebrali łącznie 34,3 kg skał, z czego większość stanowiły bazalty (bogate w oliwiny $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$, pigeonit (klinopiroksen o wzorze $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$) oraz ilmenit FeTiO_3). Dodatkowo po raz pierwszy udało się sprowadzić na Ziemię bazalty KREEP (wzbogacone w potas (K), pierwiastki ziem rzadkich (REE; ang. *rare earth elements*) oraz fosfor (P)). Kolejna amerykańska ekspedycja (Apollo 14) pobrała 42,3 kg próbek zawierających fragmenty brekcji oraz stopów impaktowych (ang. *impact melts*) o składzie bazaltów KREEP. Pobrane regolity składają się głównie z brekcji impaktowych, bazaltów oraz troktolitowych anortozytów. Podczas misji Apollo 15 zebrano 77,3 kg próbek skał obszaru mórz księżycowych i spoza tego obszaru. Są to głównie anortozyty, granulity, bazalty KREEP, stopy impaktowe (*impact melts*) oraz ultramaficzne szkliwo wulkaniczne (ang. *ultramafic volcanic glasses*) (Hiesinger i Head 2006; Mayer 2012). Interesujące są próbki granulitów, reprezentujące skały które zostały poddane metamorfozie termicznej, tworząc ziarnistą (granularną) teksturę, od której wywodzi się ich nazwa. Niekiedy wykazują one ślady częściowego topienia lub nawet charakteryzują się magmową (poikilitową) strukturą i mogą być produktem zderzeń (ang. *impact melts*). Spotykane są one zawsze jako brekcje (Taylor i in. 2017). Przetransportowane na Ziemię próbki księżycowe misji Apollo 15 praktycznie całkowicie są produktami powstałymi



Rys. 8. Miejsca lądowań i poboru próbek księżycowych misji: Apollo, Łuna oraz Chang'e 5 (Li i in. 2022b).

Fig. 8. Landing and sampling sites of the lunar missions: Apollo, Luna and Chang'e 5 (Li et al. 2022b).

podczas incydentów zderzeniowych (*impact products*). Większość z nich to stopy impaktowe (*impact melts*), brekcje oraz skały o składzie anortozytów (*anorthositic rocks*). Ostatnia misja Apollo 17, zwińczająca cały amerykański program Apollo, dostarczyła przede wszystkim: bazalty bogate w tytan, bazalty ilmenitowe i wtrofirowe (o strukturze „szklistej”, zawierające duże ilości szkliwa wulkanicznego), brekcje oraz regolit (Hiesinger i Head 2006; Mayer 2012).

Najnowsze próbki księżycowe pochodzą z chińskiej misji Chang’e 5, która zgromadziła materiał z północno-wschodniego obszaru *Oceanus Procellarum* (Ocean Burz). Są to pierwsze próbki materii księżycowej przywiezione na Ziemię po 45 latach od zakończenia amerykańskich misji Apollo. W pobranej próbce regolitu znalazły się klasty wulkaniczne (głównie bazalty), szkliwo, zlepience – materiał scementowany (*agglutinates*) oraz brekcje. Przeprowadzone analizy składu mineralnego i chemicznego wykazały, że pobrana przez chińską misję próbka zawiera materiał o małej zawartości Ti, Al, oraz K. Stwierdzony w pobranej próbce gruntu wysoki wskaźnik FeO i niski wskaźnik Mg, może wskazywać na nowy rodzaj bazaltu księżycowego (Li i in. 2022b).

Kolejne próbki uzupełniające i weryfikujące zapewne naszą wiedzę o Srebrnym Globie zostaną przywiezione przez program Artemis. Jest on realizowany przez NASA, prywatne spółki kosmiczne i międzynarodowych partnerów (ESA, JAXA, CSA). Jego celem jest ponowne wysłanie ludzi na Księżyc, w tym pierwszej kobiety, w 2025 r. Głównym celem programu Artemis (nawiązującego do programu Apollo – Artemida według mitologii była bliźniaczą siostrą Apolla) jest ponowna obecność ludzi i założenie bazy na Księżycu. W skład załogi programu mają wchodzić przede wszystkim naukowcy, którzy założą pierwszą stałą bazę na Księżycu. Będą w niej sprawdzane technologie, które mają zostać użyte w późniejszej misji na Marsa (planowanej na lata 30. XXI w., po rozwoju stacji Gateway). Będzie to pierwsze lądowanie ludzi na Srebrnym Globie po 50 latach (Apollo 17 dotarł tam 11.12.1972 r.). Artemis 1 został wystrzelony w 2022 r. i był to bezzałogowy lot statku Orion wokół Księżyca. Artemis 2 przewiduje zabranie 4 astronautów, z czego 2 wyląduje na Srebrnym Globie na 6,5 dnia (<https://nasa.gov>). Próbki przywiezione przez astronautów biorących udział w tym programie pozwolą na dalsze analizy materii księżycowej, a ich bezpośrednie spostrzeżenia umożliwią jeszcze bardziej precyzyjne opisanie geologii i geomorfologii Srebrnego Globu.

Podsumowanie i wnioski

Wspólna początkowa ewolucja Ziemi i Księżyca jako pozderzeniowej synestii spowodowała, że skały obu tych grawitacyjnie związanych ze sobą ciał, są bardzo do siebie podobne pod względem wyglądu, struktury, składu mineralnego i chemicznego oraz izotopowego. Na Ziemi dysponujemy już ponad toną materii zgromadzonej jako meteoryty księżycowe (od grudnia 2022 r.), a łącznie z próbkami przywiezionymi przez kosmiczne misje księżycowe mamy do dyspozycji ponad 1,4 tony materii Księżyca. Dzięki dostępności obecnie do takiej ilości

materii księżycowej na Ziemi możemy dokonać coraz pełniejszej i coraz bardziej szczegółowej charakterystyki skał tworzących skorupę Srebrnego Globu. Jest to podstawą do badań surowcowych i złożowych niezbędnych przed kolonizacją Księżyca lub budową na jego powierzchni baz umożliwiających dalszą eksplorację Układu Słonecznego. Należy podkreślić szczególnie szybki przyrost masy i liczby próbek skał księżycowych (meteorytów) w ciągu ostatnich kilku lat (od roku 2015), dzięki poszukiwaniom meteorytów głównie na gorących, ale także i zimnych pustyniach.

Jak można się przekonać dzięki analizie przywiezionych na Ziemi próbek, ale także meteorytów, wśród skał księżycowej skorupy dominują skały magmowe oraz produkty zderzeń (szokowe skały metamorficzne). Skały magmowe głębinowe reprezentują przede wszystkim anortozyty, a także gabra, gabra oliwinowe, trokto-lity oraz noryty. Natomiast skały magmowe wylewne reprezentują różne odmiany bazaltów, w tym szczególnie interesujące są bazalty KREEP. Są one bogate w potas, pierwiastki ziem rzadkich i fosfor. Mają one zatem duże potencjalne znaczenie złożowe, podobnie jak i bazalty bogate w tytan, zawierające dużą ilość ilmenitu. Skały będące efektem zderzeń kosmicznych reprezentowane są przede wszystkim przez różne odmiany brekcji, najczęściej są to brekcje skaleniowe, które powstają w rejonach wyżynnych zbudowanych z anortozytów, bogatych w plagioklasy wapniowe. Poza tym są to także brekcje bazaltowe i inne rzadko spotykane. Wszystkie brekcje należałoby uznać za skały metamorficzne, będące produktem metamorfizmu impaktowego (zderzeniowego). Skały osadowe luźne reprezentuje regolit księżycowy utworzony przez luźne, nagromadzone okruchy skalne produkowane w czasie zderzeń i rozdrabnianie oraz kształtowane przez uderzenia mikrometeorytów i cząstki wiatru słonecznego. Niektóre z tych zderzeń mogą powodować aglutynację stopionym materiałem skalnym (szkliwem), czyli łączenie luźnych składników regolitu w skałę okruchową zwięzłą. Skały takie – aglutynaty (aglomeraty) mogą być odpowiednikiem ziemskich zlepieńców, mimo że procesy prowadzące do ich powstania na Księżycu są zupełnie inne, niż na Ziemi.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania wszystkim osobom, które udzieliły nam pomocy w przygotowaniu ostatecznej wersji tego artykułu. Każda pomoc była bezcenna, gdyż z tematyką budowy geologicznej Księżyca, zgromadzonych na nim surowców oraz charakterystyki skał, które docierają ze Srebrnego Globu na Ziemię zderzyliśmy się dopiero w roku 2021. Jest to pierwszy z cyklu naszych artykułów poświęconych zagadnieniom „księżycowym”. Szczególne podziękowania kierujemy do Recenzentów. W pierwszej kolejności do Pani Dr Agaty Krzesińskiej, a także do Prof. Andrzeja Muszyńskiego. Przekazali nam oni tak wiele uwag do pierwszej wersji manuskryptu, że konieczne było wykonanie dalszych prac badawczo-poszukiwawczych, aby sprostać wszystkim postawionym nam wyzwaniom. Dzięki temu nie tylko nasz manuskrypt stał się bardziej rzetelny i kompletny, ale także urosła nasza wiedza, co w przyszłości na pewno ułatwi nam dalsze prace naukowe i przygotowanie kolejnych publikacji. Składamy serdeczne podziękowania także Koleżankom i Kolegom z Polskiego Towarzystwa Meteorytowego za udzielenie nam wielu informacji na temat meteorytów księżycowych zgromadzonych w polskich kolekcjach, m.in. Kazimierzowi Mazurkowi i Markowi Woźniakowi. Wreszcie dziękujemy Kolegom: Marcinowi Cimale, Tomaszowi Jakubowskiemu i Markowi Woźniakowi za udostępnienie nam fotografii meteorytów księżycowych z ich prywatnych kolekcji.

Dzięki temu mogliśmy pięknie zilustrować nasz tekst, co daje szansę, że czytelnikowi nie wyda się on za długi, nużący i zbyt specjalistyczny.

Streszczenie

Autorzy zwrócili uwagę na sklasyfikowanie w grudniu 2022 roku już ponad tony meteorytów księżycowych, jakie spadły na Ziemię. Znajdowane były one od początku lat sześćdziesiątych XX wieku, jednak pierwsze ich klasyfikacje jako meteorytów księżycowych wykonane zostały dopiero w 1982 roku. Możliwe to było dzięki bardziej zaawansowanym badaniom geochemicznym i możliwości odniesienia ich wyników do wyników analiz prób skał i regolitu księżycowego przywiezionych przez misje radzieckie programu Łuna, a przede wszystkim przez kilka misji amerykańskich programu Apollo. Dzięki dostępowi na Ziemi do ponad 1,4 tony skał księżycowych możemy obecnie prowadzić multidyscyplinarne badania geologii Księżyca. Ich wyniki są szczególnie ważne w kontekście budowy osiedli ludzkich lub baz na Księżycu w celu dalszej eksploracji Układu Słonecznego. Dotyczy to zarówno właściwości fizycznych tych skał, a także ich składu chemicznego i mineralnego w kontekście występowania złóż różnorodnych surowców mineralnych. Należy podkreślić, że materiału meteorytowego z Księżyca przybywa w ziemskich kolekcjach (zwłaszcza naukowych) bardzo szybko dopiero od roku 2015. Jest to efektem szeroko zakrojonych prac poszukiwawczych przede wszystkim na obszarze Antarktydy, Afryki, Półwyspu Arabskiego i Australii.

Wśród zidentyfikowanych skał docierających na Ziemię w postaci meteorytów księżycowych najliczniej reprezentowane są brekcje skaleniowe (impaktowe skały metamorficzne), anortozyty (skały magmowe głębinowe budujące wyżynne obszary Srebrnego Globu) oraz bazalty (skały magmowe wylewne budujące obszary mórz księżycowych). Poza tym spotykane są inne skały magmowe zasadowe, takie jak gabro, noryt, troktolit i inne. Powierzchnię skorupy pokrywa regolit złożony z fragmentów wymienionych skał magmowych i brekcji poddanych rozdrabnianiu kolejnymi zderzeniami z meteorytami i mikrometeorytami oraz działaniu cząstek wiatru słonecznego (wietrzenie kosmiczne). W wyniku tych procesów powierzchnia Księżyca pokryta jest warstwą luźnej skały osadowej okruczowej o miąższości od kilku do kilkunastu metrów. Lokalnie regolit może być skałą osadową okruczową związłą, jeśli znaczna liczba okruczów skalnych ulegnie połączeniu (zespawaniu – ang. *welding*) szklivem produkowanym w czasie zderzeń z mikrometeorytami.

Autorzy przedstawili także krótko genezę i ewolucję oraz budowę geologiczną Księżyca w oparciu o wyniki najnowszych badań geofizycznych i geochemicznych (w tym izotopowych) oraz mineralogicznych i petrologicznych. Wskazali, że zaproponowany model genezy Księżyca z synestii utworzonej po zderzeniu proto-Ziemi z innym hipotetycznym embriem planetarnym o nazwie Theia, dobrze tłumaczy jednorodność chemiczną i izotopową Ziemi i Księżyca. Autorzy zwrócili także uwagę, że dzięki wspólnej genezie meteoryty księżycowe klasyfikowane i nazywane są tak samo, jak skały ziemskie, co zdecydowanie odróżnia je od innych meteorytów. Wyjątek stanowią meteoryty marsjańskie oraz HED, które klasyfikowane są podobnie, jak skały ziemskie, aczkolwiek ich nazwy często nie mają odpowiedników w klasyfikacji skał ziemskich (np. meteoryty SNC). Śledząc dane na temat oficjalnie klasyfikowanych meteorytów księżycowych autorzy stwierdzili, że w grudniu 2022 roku łączna masa materii meteorytowej uznanej za pochodzącą z Księżyca przekroczyła 1 tonę. Meteoryty księżycowe są obecnie największym źródłem informacji o geologii Srebrnego Globu, stanowiąc niemal 2/3 masy materii księżycowej dostępnej do badań na Ziemi.

Słowa kluczowe: Księżyc, meteoryt księżycowy, bazalt, anortozyt, brekcja skaleniowa

Literatura

- Bell S., Joy K., Moore K., 2022, *50 years of Luna legacy*, Astronomy & Geophysics, 63(1), s. 1.14–1.20, doi:10.1093/astrogeo/atac008
- Eugster O., Herzog G.F., Marti K., Caffee M.W., 2006, *Irradiation Records, Cosmic-Ray Exposure Ages, and Transfer Times of Meteorites*, w: Lauretta D.S., McSween H.Y. (red.) –

- Meteorites and the Early Solar System II*, Space Science Series, University of Arizona Press, s. 829–851.
- Gladman B.J., Burns J.A., Duncan M.J., Levison H.F., 1995, *The dynamical evolution of lunar impact ejecta*, *Icarus*, 118, s. 302–321.
- Gladman B.J., Burns J.A., Duncan M., Lee P., Levison H.F., 1996, *The exchange of impact ejecta between terrestrial planets*, *Science*, 271, s. 1387–1392.
- Hiesinger H., Head J.W., 2006, *New View of Lunar Geoscience: An Introduction and Overview*, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 60, s. 1–81, doi:10.2138/rmg.2006.60.1
- Hu S., He H., Ji J., Lin Y., Hui H., Anand M., Tartèse R., Yan Y., Hao J., Li R., Gu L., Guo Q., He H., Ouyang Z., 2021, *A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5*, *Nature*, 600, s. 49–53, doi:10.1038/s41586-021-04107-9
- IUGS, 2022, International Chronostratigraphic Chart ver. 2022/2. International Union of Geological Sciences, International Commission on Stratigraphy, www.stratigraphy.org
- Jaumann R., Hiesinger H., Anand M., Crawford I.A., Wagner R., Sohl F., Jolliff B.L., Scholten F., Knapmeyer M., Hoffmann H., Hussmann H., Grott M., Hempel S., Köhler U., Krohn K., Schmitz N., Carpenter J., Wiczorek M., Spohn T., Robinson M.S., Oberst J., 2012, *Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding*, *Planetary and Space Science*, 74, s. 15–41, doi:10.1016/j.pss.2012.08.019
- Ji J., Guo D., Liu J., Chen S., Ling Z., Ding X., Han K., Chen J., Cheng W., Zhu K., Liu J., Wang J., Chen J., Ouyang Z., 2022, *The 1:2,500,000-scale geologic map of the global moon*, *Science Bulletin*, doi:10.1016/j.scib.2022.05.021
- Kallio E., Dyadechkin S., Wurz P., Khodachenko M., 2019, *Space weathering on the Moon: Farside-nearside solar wind precipitation asymmetry*, *Planetary and Space Science*, 166, s. 9–22, doi:10.1016/j.pss.2018.07.013
- Leya I., Masarik J., 2009, *Cosmogenic nuclides in stony meteorites revisited*, *Meteoritics & Planetary Science*, 44, s. 1061–1086, doi:10.1111/j.1945-5100.2009.tb00788.x
- Li J.-H., Yang W., Li X.-Y., He Y.-S., 2022a, *The Chang'e-5 Lunar Samples Stimulate the Development of Microanalysis Techniques*, *Atomic Spectroscopy*, 43(1), s. 1–5, doi:10.46770/AS.2022.010
- Li Ch., Hu H., Yang M., Pei Z., Zhou Q., Ren X., Liu B., Liu D., Zeng X., Zhang G., Zhang H., Liu J., Wang Q., Deng X., Xiao C., Yao Y., Xue D., Zuo W., Su Y., Wen W., Ouyang Z., 2022b, *Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission*, *National Science Review*, 9(2), nwab188, doi:10.1093/nsr/nwab188
- Lin H., Yang Y., Lin Y., Liu Y., Wei Y., Li S., Hu S., Yang W., Wan W., Xu R., He Z., Liu X., Xing Y., Yu C., Zou Y., 2020, *Photometric properties of lunar regolith revealed by the Yutu-2 rover*, *Astronomy & Astrophysics*, 638, s. A35, Planets and planetary systems section, doi:10.1051/0004-6361/202037859
- Lock S.J., Stewart S.T., Petaev M.I., Leinhardt Z., Mace M.T., Jacobsen S.B., Čuk M., 2018, *The origin of the Moon within a terrestrial synestia*, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123, s. 910–951, doi:10.1002/2017JE005333
- Lucey P., Korotev R. L., Gillis J. J., Taylor L. A., Lawrence D., Campbell B. A., Elphic R., Feldman R., Hood L. L., Hunten D., Mendillo M., Noble S., Papike J. J., Reedy R. C., Stefanie Lawson S., Prettyman T., Gasnault O., Maurice S., 2006, *Understanding the Lunar Surface and Space-Moon Interactions*, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 60, s. 83–219, doi:10.2138/rmg.2006.60.1
- Łuszczek K., Dalcher N., Leya I., 2012, *Cosmogenic and radiogenic noble gases in the Soltmany L6 chondrite*, *Meteorites*, 2(1/2), s. 39–43.

- Mayer C., 2012, *Lunar Sample Compendium. Astromaterials Research & Exploration Science (ARES), NASA*; <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/index.cfm>; dostęp: 06.12.2022.
- MetBull, 2022, *The Meteoritical Bulletin Database, The Meteoritical Society*; <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>; dostęp: 1.12.2022.
- Orloff R.W., 2004, *Apollo by the Numbers: A Statistical Reference*, NASA History Division, Office of Policy and Plans, NASA Headquarters, Washington, DC
- Taylor G.J., Martel L.M.V., Kring D.A., 2017, *Lunar granulitic breccias and their role in understanding the lunar mantle and large impact events*, Lunar and Planetary Science XLVIII, 1591.pdf
- Taylor S.R., McLennan S.M., 2010, *Planetary crusts: Their composition, origin and evolution*, Cambridge University Press, UK
- Warren P.H., 1994, *Lunar and Martian meteorite delivery services*. *Icarus*, 111, s. 338–363.
- Wieler R., 2002, *Cosmic-ray-produced noble gases in meteorites*, [w:] *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry, Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Porcelli D., Ballentine C.J., Wieler R. [eds.] Mineralogical Society of America, Washington DC, s. 125–170.
- Zhang D, Chen Y., Yang W., Fournelle J.H., Ji J., Su B., Mao Q., Jia L., Yuan J., Li X., 2022, *High-precision Measurement of Trace Level Na, K, P, S, Cr, and Ni in Lunar Glass Using Electron Probe Microanalysis*, *Atomic Spectroscopy*, 43(1), s. 28–41, doi:10.46770/AS.2022.001
- <http://www2.jpl.nasa.gov/saturn/faq.html>, dostęp 29.01.2023.
- <https://www.nasa.gov/specials/artemis/>, dostęp 2.02.2023.