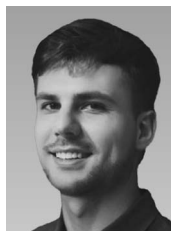


Czy na Dolnym Śląsku występują naturalne analogi skał księżycowych?

Tadeusz A. Przylibski¹, Mateusz Szczęśniewicz¹, Konrad Blutstein¹



T.A. Przylibski



M. Szczęśniewicz



K. Blutstein

Are there natural analogues of Moon rocks in Lower Silesia? Prz. Geol., 72: 26–46; doi: 10.7306/2024.2

A b s t r a c t. We describe the geological structure of the Moon and its evolution from the time of its joint formation with the Earth to the present. The common origin of both of these bodies justifies the search for analogues of the rocks that build the Earth and the Moon. On this basis, we characterize the rocks that constitute the crust of the Moon. These comprise rocks of the primary planetary anorthosite crust: anorthosites and, subordinately, other gabbroid rocks (gabbros, troctolites, norrites). These rocks make up the lunar highlands and mainly build the far side of the Moon. On the near side, there are vast areas covered with basaltoids

several hundred meters thick, of various ages: the lunar maria. These two types of igneous rocks constitute the Moon's crust. Its surface is covered with material produced by impact metamorphism from incoming asteroids, meteoroids, micrometeoroids and interplanetary dust, as well as resulting from the crust's interaction with solar wind particles and cosmic radiation. This regolith comprises loose material a few to several meters thick. We compare the chemical composition of these lunar igneous rocks with the chemical composition of the igneous rocks of Lower Silesia. Basaltoids, anorthosites, gabbros and troctolites were included in our analysis. We conclude, unsurprisingly, that it is currently impossible to indicate the occurrence of natural analogues of lunar rocks in Lower Silesia. There are large differences between the chemical composition between the rocks constituting the primary planetary crust of the Moon and the igneous alkaline rocks of Lower Silesia, the latter representing strongly differentiated igneous rocks of the Earth's crust and upper mantle. Nevertheless, in the case of basaltoids, it will likely be possible in the near future to find rocks that can, with some approximation, be considered analogues of lunar basaltoids. At present, potential locations of lunar-like basalts and foidites include the Zareba and Księginki quarries near Lubań. In the case of plutonic rocks, especially anorthosites, Lower Silesian analogues of lunar rocks will be very approximate. However, based on basaltoid rocks from Lower Silesia, and perhaps later also using gabbroid rocks, it should be possible to produce a natural analogue of the lunar regolith. Rock material from terrestrial analogues will have to be significantly processed both physically and chemically to obtain the composition and structure of this regolith material. These considerations, however, are not the purpose of this work. We focus primarily on analogies of chemical and mineral composition, as the basic features enabling the production of a lunar regolith analogue. We are particularly interested in pointing out analogies resulting from the composition of the parent magmas of these rocks, as reflected in the chemical composition of the rocks and their mineral composition. Due to significant differences in the age of crystallization of lunar magmas and their conditions of this crystallization compared to the rocks of Lower Silesia (on Earth), it is not presently possible to indicate Lower Silesian age-analogues of lunar rocks or structural and textural analogues.

Keywords: The Moon, basalt, anorthosite, feldspar breccia, lunar meteorite, regolith, synestia

Obecnie, podobnie jak w latach 60. XX w., loty na Księżyc, a zwłaszcza budowa baz, w których przez długi czas będą pozostawać ludzie, wydają się być odległe w czasie. Jednak NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) realizuje rozpoczęty w 2022 r. swój kolejny program księżycowy – *Artemis*. Nazwa programu pochodzi od greckiej bogini Artemidy, bliźniaczej siostry Apolla, w mitologii greckiej utożsamianej z Księżycem, Seleną, będącą personifikacją Księżycyca, a także córka Thei. Celem programu *Artemis* jest już w 2025 r. wysłanie kolejnej załogowej wyprawy lądującej na powierzchni Srebrnego Globu (w tym pierwszej kobiety i pierwszego astronauty rasy innej niż biała), a w dalszej kolejności budowa bazy naukowej na Księżycu. Będą tam realizowane następne badania naszego naturalnego satelity oraz testowane systemy i urządzenia niezbędne do załogowej misji marsjańskiej (<https://www.nasa.gov/specials/artemis/#top>; 2023). Badania związane z Księżycem, jego

budową geologiczną i zasobami surowcowymi stają się coraz bardziej zaawansowane. Są one logiczną kontynuacją programów księżycowych z XX w. – amerykańskiego *Apollo* i radzieckiego *Łuna*, a także dopełnieniem i rozszerzeniem obecnie trwającego programu chińskiego *Chang'e* i indyjskiego *Chandrayaan*.

Obecnie badania Księżycyca są już na tyle zaawansowane, że wchodzi w fazę umożliwiającą określanie potencjalnych surowców występujących na powierzchni Srebrnego Globu, a nawet szacowanie ich zasobów. Służyć ma to przede wszystkim rozpoznaniu terenu i jak najlepszemu przygotowaniu się do zlokalizowania w odpowiednim miejscu baz lub osiedli księżycowych, które mogłyby gościć stałą kilkuosobową załogę przez długi okres czasu i działać w jak największej mierze autonomicznie, tzn. w oparciu o wykorzystanie lokalnie dostępnych surowców (tzw. SRU lub ISRU – *Space Resource Utilization* lub *In Situ Resource Utilization*; Anand i in., 2012; Schwandt

¹ Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; Tadeusz.Przylibski@pwr.edu.pl; Mateusz.Szczesniewicz@pwr.edu.pl; Konrad.Blutstein@pwr.edu.pl; ORCID ID: Tadeusz A. Przylibski – 0000-0002-8094-7944, Konrad Blutstein – 0000-0003-1337-774X; Mateusz Szczęśniewicz – 0000-0003-2006-7950

i in., 2012; Bennett i in., 2020; Hadler i in., 2020; Rasera i in., 2020). Wśród tych surowców niewątpliwie najważniejsza jest woda, z której można także uzyskać tlen. Są to główne składniki potrzebne do podtrzymywania życia. Ważne jest także otrzymywanie H_2 i O_2 jako paliwa raketowego, a także pierwiastków niezbędnych w procesach metalurgicznych i chemicznych (Anand i in., 2012; Schwandt i in., 2012; Bennett i in., 2020; Casanova i in., 2020; Lomax i in., 2020; Schlüter, Cowley, 2020; Rasera i in., 2020; Reiss i in., 2020). Obecnie uważa się, że w okolicach biegunów Księżyca, w obszarach, do których nie dociera światło słoneczne (*permanently shadowed regions* – PSRs) – na dnach niektórych kraterów występuje woda w postaci lodu H_2O (Anand i in., 2012; Hayne i in., 2015, 2021; Casanova i in., 2020). Lód wodny może występować również w innych obszarach Księżyca w warstwach regolitu, gdzie cząsteczki H_2O i OH^- są produkowane przez protony wiatru słonecznego oddziałujące z bogatymi w tlen powierzchniami rozdrobionych ziaren skał wytwarzanych podczas uderzeń mikrometeoroidów w księżycowy regolit (Jaumann i in., 2012). Badania próbek gleby księżycowej przywiezionych przez chińską misję *Chang'e 5* pozwoliły stwierdzić, że zawarte w regolicie zastygnięte krople szkliska zderzeniowego zawierają znaczące ilości cząsteczek wody (Honnibal i in., 2021). Obecnie ocenia się, że w powierzchniowej warstwie regolitu w zastygniętych kroplach szkliska zderzeniowego może być zgromadzone $2,7 \cdot 10^{14}$ kg wody (He i in., 2023). Woda zawarta jest także w niektórych minerałach skał księżycowych (w regolicie; Liu i in., 2022; Zhou i in., 2022). Wykonywane są także prace eksperymentalne z wykorzystaniem symulantów regolitu księżycowego, mające na celu redukcję regolitu do uzyskania z niego tlenu oraz metali, a także wody (Schwandt i in., 2012; Lomax i in., 2020; Sargeant i in., 2021). Poza tym interesujące w perspektywie górniczej aktywności na Księżycu wydają się obecnie nagromadzenia takich surowców jak ilmenit ($FeTiO_3$), który obok plagioklazów (głównie anortytu), piroksenów i oliwinów, jest najbardziej rozpowszechnionym minerałem w skałach księżycowych (Rubin, Ma, 2017; Rasera i in., 2020). Ilmenit jest minerałem rudnym tytanu i żelaza. Również inne minerały, w sytuacji braku możliwości szybkiego i taniego zaopatrzenia w niezbędne surowce z Ziemi, stanowią potencjalne źródło pozyskania wybranych surowców. Na podstawie badań próbek skalnych dostarczonych przez misje kosmiczne, a także w formie meteoroidów odnalezionych na Ziemi (głównie badań klastów budujących najpowszechniejsze wśród meteoroidów brekcje) można zdefiniować potencjalne inne minerały mogące być obiektem eksploatacji (tab. 1). Szczególnie interesujący może być cyrkon, wchodzący w skład skał KREEP (skał wzbogaconych w potas (K), pierwiastki ziem rzadkich REE oraz fosfor (P); potencjalne źródło hafnu i REE). W skałach księżycowych zidentyfikowano również: armalcolit ($(Mg,Fe)Ti_2O_5$), rutil (TiO_2), cyrkonalit ($(Ca,Fe)(Zr,REE)(Ti,Nb)_2O_7$), chalkopiryt ($CuFeS_2$), kubanit ($CuFe_2S_3$), pentlandyt ($(Ni,Fe)_9S_8$) oraz sfaleryt (ZnS), jednak minerały te występują bardzo rzadko (Papike i in., 1991). Ponadto skały KREEP są wzbogacone w uran i tor, a także potas i fosfor oraz żelazo (FeO) (Yamashita i in., 2010; Li i in., 2022a).

Tab. 1. Występowanie minerałów o potencjale górniczym w wybranych typach skał obecnych na Księżycu (na podstawie: Papike i in., 1991; Rubin, 1997; Rubin, Ma, 2017)

Table 1. Occurrence of minerals with mining potential in selected rock types present on the Moon (based on: Papike et al., 1991; Rubin, 1997; Rubin, Ma, 2017)

Mineral <i>Mineral</i>	Wzór chemiczny <i>Chemical formula</i>	Bazalty <i>Basalts</i>	Anortozyty <i>Anorthosites</i>	Skały KREEP <i>KREEP rocks</i>	Brekcje <i>Breccias</i>
Chlorapatyt <i>Chlorapatite</i>	$Ca_5[Cl](PO_4)_3$			+	+
Chromit <i>Chromite</i>	$FeCr_2O_4$	+	+		+
Cyrkon <i>Zircon</i>	$Zr[SiO_4]$			+	
Ilmenit <i>Ilmenite</i>	$FeTiO_3$	+	+	+	+
Kamacyt <i>Kamacite</i>	$\alpha-(FeNi)$	+	+		+
Taenit <i>Taenite</i>	$\gamma-(FeNi)$	+	+		+
Troilit <i>Troilite</i>	FeS	+	+	+	+
Ulvöspinel <i>Ulvöspinel</i>	$TiFe_2O_4$	+			+

Natomiast plagioklasy (anortyt) anortozytów są znacznie wzbogacone w europ (Taylor, McLennan, 2010). W warstwie powierzchniowej – w regolicie Księżyca – występują także skały będące fragmentami innych obiektów Układu Słonecznego, które na powierzchnię naszego satelity spadły w postaci meteoroidów. Przyjmując, że ok. 2% objętości regolitu stanowi materiał meteoroidowy (Melosh, 2011; Jaumann i in., 2012), to znaczną jego część będą stanowić ziarna $FeNi(Co)$ (tab. 1). W przypadku meteoroidów żelaznych będzie to niemal 100%, ale w przypadku niektórych chondrytów węglistych będzie to praktycznie 0%. Przyjmując średnią zawartość wagową ziaren $FeNi$ (w formie kamacytu, taenitu i podrzędnie tetraetaenitu) dla chondrytów zwyczajnych na poziomie ok. 14% (Łuszczek, Przylibski, 2019, 2021), można szacować, że ok. 0,2% objętości regolitu stanowią ziarna zbudowane z Fe , Ni i podrzędnie Co z niewielkimi domieszkami innych metali. Zatem regolit stanowi już wstępnie rozdrobioną polimetaliczną rudę żelaza, niklu i kobaltu.

Nadal, od ponad 30 lat perspektywnym surowcem na Księżycu pozostaje izotop 3He . $He-3$ to bardzo wydajne i czyste paliwo jądrowe, które może być stosowane w reakcjach fuzji jądrowej ($D-^3He$) zamiast trytu (NASA, 1988). Jednak technologia ta jest nadal daleka od przemysłowego wdrożenia. Zatem dyskutowana już od lat 80. XX w. (NASA, 1988) możliwość eksploatacji 3He z regolitu Księżyca nadal pozostaje daleką perspektywą, zwłaszcza w porównaniu do innych wspomnianych kopalni. 3He jest składową wiatru słonecznego i może być implantowany (wbijany) w kryształy minerałów tworzących powierzchniową warstwę regolitu. Zatem największe jego ilości są związane z obszarami, w których strumień wiatru słonecznego jest największy, a jednocześnie regolit jest dojrzały (w sensie długo wystawiony na działanie promieniowania kosmicznego, co powoduje m.in. spadek jego refleksyjności). Izotop 3He jest najlepiej akumulowany w kryształach ilmenitu ($FeTiO_3$). Zatem jego najbogatsze zasoby są związane z nagromadzeniami w regolicie tego minerału. Rejonami takimi są morza na widocznej stronie Księżyca, bogate w tytan (ilmenit),

a więc przede wszystkim obszar Terranu Procellarum KREEP. W obszarze tym można spodziewać się koncentracji ^3He w regolicie na poziomie dochodzącym do 20 ppb (masy) (Johnson i in., 1999) lub nawet powyżej (Fa, Jin, 2007), do 24 ppb (Kim i in., 2019). Ocenia się, że całkowite zasoby ^3He wynoszą ok. $6,6 \cdot 10^8$ kg, przy czym większość ($3,7 \cdot 10^8$ kg) jest zgromadzona na półkuli widocznej, a pozostałe $2,9 \cdot 10^8$ kg na półkuli niewidocznej. Zjawisko to jest związane ze znacznie większą zawartością ilmenitu w regolicie bazaltów półkuli widocznej. Brak ilmenitu gromadzącego ^3He na półkuli niewidocznej powoduje, że nawet większy strumień cząstek wiatru słonecznego nie może zdeponować większej ilości atomów ^3He (Fa, Jin, 2007, 2010). Jednym z proponowanych sposobów eksploatacji ^3He z ilmenitu w regolicie księżycowym jest szybkie ogrzewanie kryształów ilmenitu do temperatury 1000 K, a po jej osiągnięciu, w czasie 1 s, uwalniane jest ze struktury kryształów ok. 75% zgromadzonego helu-3 (Song i in., 2021).

W celu przyszłego wydobywania i przerabiania złóż surowców na Księżycu już obecnie są opracowywane odpowiednie technologie i techniki eksploatacyjne oraz przerobcze (Just i in., 2020; Ramera i in., 2020; Reiss i in., 2020; Wasilewski, 2021; Zwierzyński i in., 2021; Li i in., 2022b). Myśli się także o technologiach i technikach przetwarzania (np. spiekania) i wykorzystywania regolitu księżycowego jako materiału budowlanego lub surowca służącego jako materiał w drukarkach 3D (Grossman i in., 2019; Lim, Anand, 2019). Poznanie właściwości fizycznych i składu chemicznego regolitu ma obecnie bardzo duże znaczenie dla rozwoju górnictwa księżycowego oraz księżycowej geotechniki i budownictwa (Wasilewski i in., 2021). Tego typu prace naukowe dotyczące badań różnych właściwości fizycznych i cech regolitu pojawiają się także w literaturze polskiej (Wiśniewski i in., 2022). Ma to niebagatelne znaczenie w związku z potrzebą produkcji symulantów regolitu księżycowego (Pitcher i in., 2016; Dominguez, Whitlow, 2019), który jest niezbędny do testów aparatury wysyłanej na Księżyc, zwłaszcza urządzeń samobieżnych i przeznaczonych do pobierania próbek gruntu (regolitu). Natomiast polscy naukowcy wciąż bardzo rzadko zajmują się budową geologiczną naturalnego satelity Ziemi i jego surowcami mineralnymi. Pierwszą w historii, a przez to nie pozbawioną wielu mankamentów (np. nieuwzględnienie najnowszych poglądów na genezę Księżyca, brak charakterystyki skał budujących skorupę Księżyca, brak charakterystyki budowy płaszczka i jądra Księżyca, nieaktualna tabela stratygraficzna i in.), publikacją dotyczącą tylko zagadnień geologii Księżyca w Polsce jest publikacja Misiaka (2022). Wcześniej o minerałach i skałach Księżyca w literaturze polskiej pojawiały się krótkie rozdziały w podręcznikach i encyklopediach (m.in. Manecki, 1988, 2004; Bolewski, Manecki, 1990). Najnowsza publikacja Ciążeli i współautorów (Ciążela i in., 2023) dotycząca m.in. geologii złożowej Księżyca nie wyczerpuje problematyki budowy geologicznej Księżyca, zostawiając wiele miejsca na przedstawienie najnowszych poglądów i dyskusji w tym zakresie, szczególnie w języku polskim, co jest jedną z ważniejszych motywacji autorów do przygotowania niniejszej publikacji.

Zarówno utrzymanie pełnej funkcjonalności bazy lub osiedla ludzkiego na Księżycu, jak i nawet w pełni zautomatyzowanej kopalni będzie wymagać testowania najrozsądniejszych urządzeń, w tym urządzeń autonomicznych. Ich

testowanie na powierzchni Księżyca będzie dopiero ostatnim krokiem przed ich ostatecznym zastosowaniem, czy wykorzystaniem do pracy w warunkach, jakie panują na powierzchni naszego naturalnego satelity. Wcześniej konstrukcje te i prototypy będą musiały przechodzić najrozsądniejsze testy na Ziemi. W związku z tym autorzy prowadzą badania przydatności skał występujących na Dolnym Śląsku do zastosowania jako naturalnych analogów skał księżycowych. Uprawnia do tego wspólna geneza tych dwóch związanych ze sobą grawitacyjnie i genetycznie ciał Układu Słonecznego. Wybrane skały Dolnego Śląska mogłyby symulować warunki geologiczne, z jakimi będą mieć do czynienia ludzie i maszyny na powierzchni Księżyca. Jest to związane z obecnością na Dolnym Śląsku zarówno skał takich jak bazalty (bazaltoidy), jak i skał z grupy gabra. Niektóre zakłady górnicze (szczególnie duże kopalnie odkrywkowe eksploatujące od wielu lat złoża bazaltoidów) mogłyby także w nieczynnych wyrobiskach tworzyć poligony badawcze dla misji księżycowych, marsjańskich i innych (Przylibski i in., 2022b). Aby możliwie optymalnie wybrać dolnośląskie analogi skał księżycowych należy zacząć od porównania ich składu mineralnego i chemicznego ze składem skał księżycowych reprezentowanych zarówno przez meteoryty lunarne, jak i próbki regolitu i skał przywiezionych przez misje kosmiczne, zwłaszcza te najłatwiej dostępne, pochodzące z amerykańskich misji programu *Apollo*. Autorzy zwrócili już uwagę na coraz większą dostępność skał księżycowych spadających na Ziemię jako meteoryty i dokonali ich wstępnej charakterystyki (Przylibski i in., 2023). Kolejnym krokiem badań Księżyca w Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej w Politechnice Wrocławskiej i głównym celem badań autorów, którego wyniki realizacji przedstawiamy w niniejszej pracy jest porównanie składu mineralnego i chemicznego skał księżycowych do wybranych skał dolnośląskich i udzielenie odpowiedzi na postawione w tytule pytanie.

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ KSIĘŻYCA

Geneza

Najbardziej wiarygodne i prawdopodobne scenariusze powstania Księżyca powinny być w stanie wyjaśnić skład chemiczny naszego satelity (przede wszystkim zawartość substancji lotnych i takich samych, jak ziemskie stosunków izotopów stabilnych), początkowy stan termiczny Księżyca oraz masę i właściwości dynamiczne układu Ziemia–Księżyc. Dotychczasowe symulacje i modele obliczeniowe wskazują, że Księżyc powstał w wyniku zderzenia dwóch embrionów planetarnych (protoplanet) w późnych stadiach wczesnego etapu ewolucji Układu Słonecznego – akrecji planetarnej. Według tego modelu, zwanego modelem kanonicznym – „hipotezą gigantycznego uderzenia”, młoda Ziemia (proto-Ziemia) doświadczyła ukośnego zderzenia z obiektem wielkości współczesnego Marsa – hipotetyczną protoplanetą o nazwie Theia. W wyniku tego zderzenia wyrzucony na orbitę Ziemi został materiał bogaty w krzemiany o masie nieco większej niż współczesna masa Księżyca, który uformował dysk. Według tego modelu jednak znaczna część materiału w dysku pochodziła z impaktora (z Thei). W ciągu kilkuset do tysięcy lat po zderzeniu, materiał dysku ochłodził się i skondensował, a także oddalił się poza granicę Roche’a, gdzie grawitacyj-

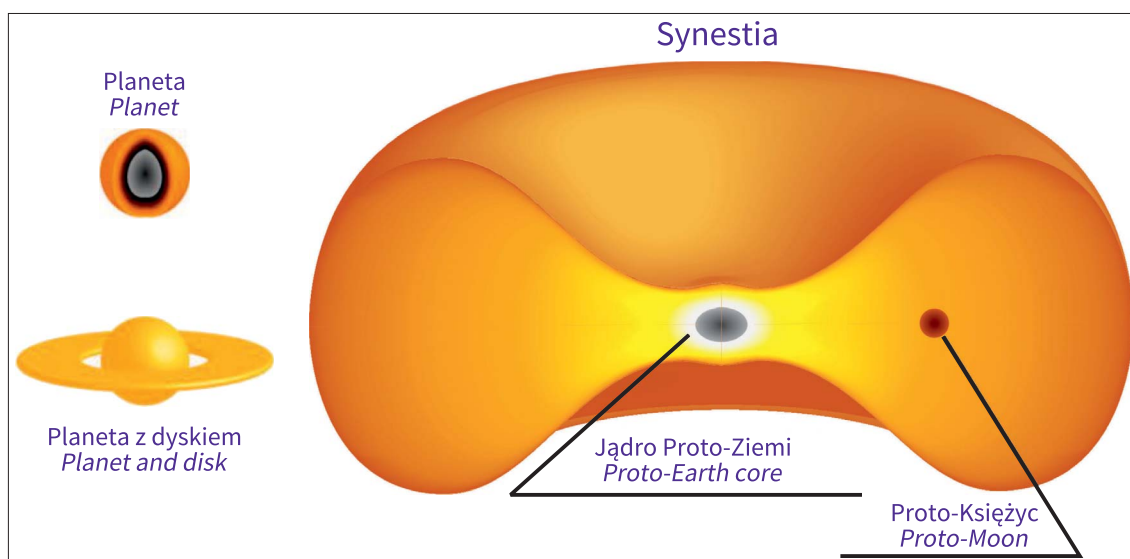
ne siły pływowe są wystarczająco małe, aby pozwoliły na akrecję. W jej wyniku utworzył się naturalny satelita Ziemi – Księżyc (Barr, 2016). Słabym punktem tego modelu jest skład Księżyca (zwłaszcza stosunki izotopowe, m.in. tlen, tytan, wolframu, chromu, rubidu, potasu i in., które są dokładnie takie jak w materii Ziemi), który wg różnych modeli powinien reprezentować skład Thei, a nie Ziemi. Wiemy jednak, że tak nie jest (Barr, 2016), albo Theia musiałaby mieć skład niemal identyczny ze składem Ziemi, co jest bardzo mało prawdopodobne, gdyż musiałaby powstać w tym samym obszarze dysku protoplanetarnego. Dlatego też nadal poszukiwano rozwiązania tego problemu, odpowiedniego modelu, który przede wszystkim powinien wyjaśnić sposób wymieszania się składników impaktora (Thei) i Ziemi po zderzeniu, aby w dysku, z którego utworzył się Księżyc znajdowała się chemicznie i izotopowo taka sama substancja jak na Ziemi, co współcześnie obserwujemy. Jednocześnie większa część momentu pędu układu Ziemia–Księżyc powinna być skupiona w Księżycu, jak to obecnie ma miejsce. Skupienie aż 1,2% masy i 80% momentu pędu w Księżycu stanowi o wyjątkowości Księżyca i układu Ziemia–Księżyc w całym Układzie Słonecznym. Znalazienie procesów prowadzących do otrzymania obserwowanego składu chemicznego Ziemi i Księżyca o takiej charakterystyce ruchu wymaga stworzenia unikalnego modelu.

Ostatnio proponowanym rozwiązaniem tego problemu jest teoria przewidująca powstanie po niecentralnym (ukośnym) zderzeniu Thei z Ziemią synestii (ryc. 1). Synestia jest nowym typem struktury planetarnej utworzonej z całkowicie odparowanych obiektów (protoplanet) biorących udział w zderzeniu. Synestia ma kształt nabrzmiałej chmury przypominającej grubego bajgla lub pączka (*doughnut*), który ma większą miąższość na zewnątrz, niż wewnątrz. Na tej zewnętrznej krawędzi chmury odparowana skała krąży tak szybko, że chmura przybiera nową strukturę, z grubym dyskiem krążącym wokół wewnętrznego obszaru. Co najważniejsze, dysk nie zostaje oddzielony od obszaru centralnego, dzięki czemu możliwe jest dokładne wymieszanie tworzącej go materii. Chłodzenie synestii napędza

mieszanie materii obu ciał biorących udział w zderzeniu, a kondensacja generuje tworzenie się i wzrastanie księżyców orbitujących w obrębie synestii, w jej zewnętrznej części. Dzięki temu Księżyc wyrównuje swój skład izotopowy i chemiczny z materią tworzącą synestię i w ciągu około roku, dzięki akrecji kondensującej materii, osiąga swoją ostateczną wielkość i masę. W ciągu kolejnych kilkudziesięciu lat ochładzająca się synestia zmniejsza swoje rozmiary, powodując oddzielenie się Księżyca od synestii, co kończy główny etap akrecji księżycowej, powodując ostateczne krzepnięcie i ochłodzenie Księżyca. Pozostała część synestii stygnie nadal i krzepnie wewnątrz granicy Roche’a, aż do utworzenia się planety, czyli Ziemi. Według tego modelu gigantyczne zderzenia, które wytwarzają potencjalne synestie, w tym tę, która uformowała Księżyc i Ziemię, były powszechne pod koniec formowania się planet typu ziemskiego w młodym Układzie Słonecznym (Lock i in., 2018). Nazwa struktury planetarnej „synestia” pochodzi od imienia greckiej bogini ogniska domowego Hestii, której symbolami były: ognisko, pochodnia, płomień, połączone z przedrostkiem „syn” oznaczającego połączenie lub zrost, w tym przypadku oznacza gorący, płonący obiekt powstały z połączenia dwóch zderzających się ze sobą protoplanet (Lock i in., 2018).

Geosfery Księżyca

Obecny stan wiedzy na temat budowy geologicznej Księżyca jest wypadkową kilku dekad badań oraz szeregu księżycowych programów eksploracyjnych (załogowe misje *Apollo* i bezzałogowe misje *Luna*, *Chang’e* i *Chandrayaan*). Efektem tych prac jest przede wszystkim zrozumienie procesów zachodzących na powierzchni, stratygrafii Księżyca i chronologii zdarzeń geologicznych. Poprzez połączenie technik teledetekcji, eksploracji powierzchni oraz pobrania próbek księżycowych, wyłonił się ogólny obraz geologii Księżyca. Jest on nieustannie uzupełniany dzięki obserwacjom prowadzonym przez satelity (np. amerykański *Lunar Reconnaissance Orbiter* (rozpoczęcie obserwacji z orbity Księżyca 15.09.2009 r.), czy indyjski *Chandrayaan-2*



Ryc. 1. Poglądowy rysunek synestii w odniesieniu do skali planety i planety z dyskiem (jak w modelu kanonicznym powstania Księżyca)

Fig. 1. Illustrative drawing of synestia in relation to the scale of the planet, and planet with a disc (like in the canonical model of Moon formation)

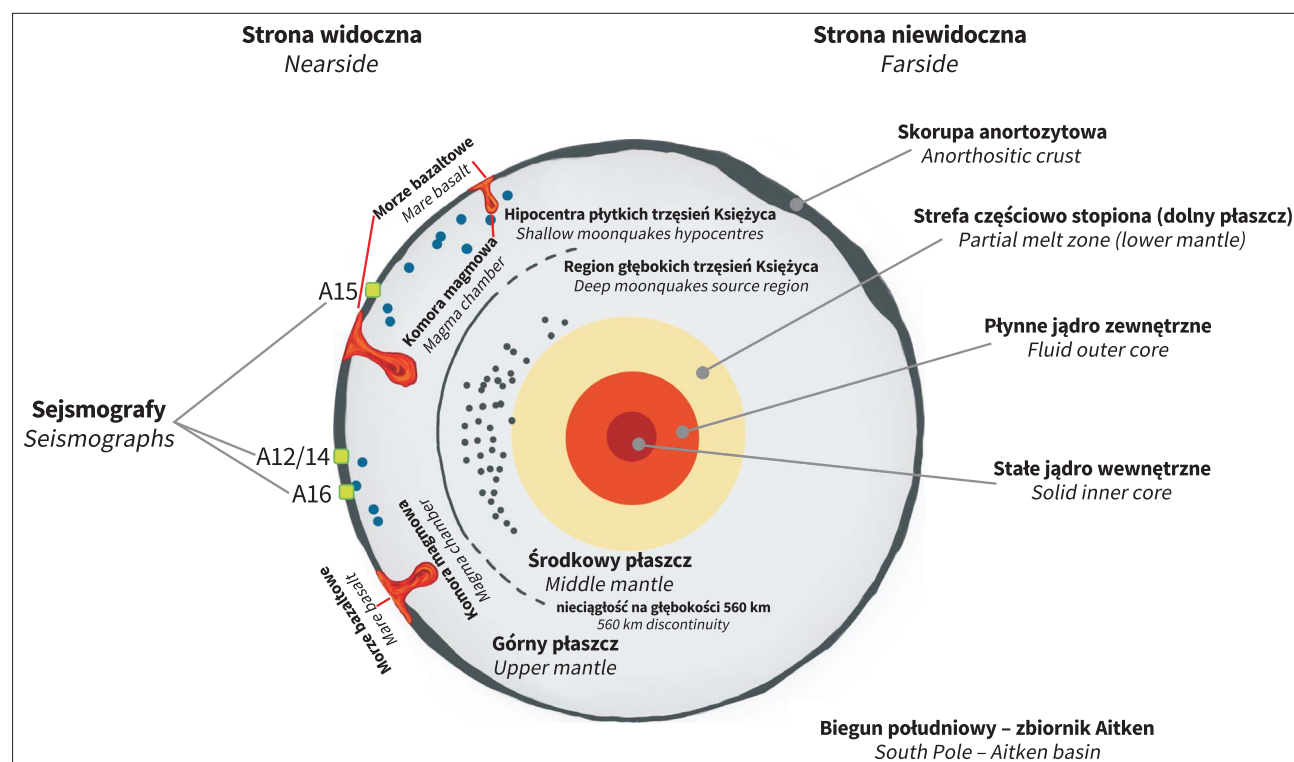
(operujący na orbicie Księżyca od 20.08.2019 r.), a także dzięki badaniom większej liczby coraz bardziej dostępnych meteorytów księżycowych (Przylibski i in., 2023).

Księżyc jest wzbogacony w pierwiastki trudnotopliwe, jest ekstremalnie suchy (*bone-dry*) i zubożony w pierwiastki lotne w odniesieniu zarówno do Ziemi, jak i chondrytów węglanych CI (Taylor, McLennan, 2010), reprezentujących najbardziej pierwotną materię Układu Słonecznego (por. np. Przylibski i in., 2022a). Księżyc ma małą gęstość, jest zubożony w żelazo metaliczne, ale zawartość żelaza utlenionego – FeO – wynosi 13% w porównaniu do 8% w ziemskim płaszczu. Wszystkie te cechy związane są z kolizyjną genezą powstania Księżyca (Taylor, McLennan, 2010).

Współczesny Księżyc, podobnie jak Ziemia, jest ciałem zdyferencjonowanym, znajdującym się w równowadze hydrodynamicznej, a więc o kształcie zbliżonym do kulistego, którego promień wynosi 1737 km. Zbudowany jest z trzech ułożonych koncentrycznie sfer. Są to: skorupa, płaszcz i jądro (ryc. 2). 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. Płaszcz ma grubość ponad 1350 km i to w jego obrębie znajduje się źródło głębokich ruchów sejsmicznych (*deep moonquakes*). Na Księżycu występują również płytkie źródła ruchów sejsmicznych. Niektóre z trzęsień księżycowych są powodowane uderzeniami (impaktami) meteoroidów. Górny płaszcz jest bogaty w pirokseny. Dolna część płaszczu naszego naturalnego

satelity może być częściowo stopiona i składa się z oliwinów bogatych w Mg tworzących kumulatory, będących prawdopodobnie pierwszym produktem krystalizacji oceanu magmy. Dane geofizyczne wskazują, że jądro jest złożone z niewielkiego jądra wewnętrznego i płynnego jądra zewnętrznego o grubości 330 km (Taylor, McLennan, 2010; Jaumann i in., 2012).

Dzisiaj Księżyc nie ma tak samo generowanego pola magnetycznego jak Ziemia. Jednak pozostałość namagnesowania skorupy księżycowej, jak i paleomagnetyczny zapis niektórych próbek skał księżycowych sugerują, że namagnesowanie skał skorupy księżycowej zostało uzyskane prawdopodobnie dzięki obecności pola magnetycznego wywołanego przez wczesne księżycowe dynamo, tj. obracające się względem siebie jądro wewnętrzne i zewnętrzne (Wieczorek i in., 2006; Jaumann i in., 2012). Współczesne badania magnetyczne skał księżycowych wskazują, że dynamo takie generowało pole magnetyczne o natężeniu na powierzchni od ~20 do 110 mT między co najmniej 4,25 a 3,56 mld lat temu. Pole to następnie osłabło do poniżej ~4 mT 3,19 mld lat temu. Badania matrycy tworzonej przez szkliwo spajające młodą brekcję regolitu wskazują, że zostało ono namagnesowane w polu magnetycznym o natężeniu $\sim 5 \pm 2$ mT około ~1 do ~2,5 mld lat temu. Dane te wydłużają znany czas życia dynamo księżycowego o co najmniej 1 mld lat. Tak długa historia wymaga niezwykle długowiecznego źródła energii, takiego jak krystalizacja jądra lub precesja. Pojedynczy mechanizm dynamo zaproponowany do tej pory nie może wyjaśnić silnego pola magnetycznego istniejącego w okresie przed 3,56 mld lat,



Ryc. 2. Przekrój przez Księżyc z widocznymi sferami: jądrem wewnętrznym, jądrem zewnętrznym, płaszczem i skorupą oraz zaznaczonymi hipocentrami zjawisk sejsmicznych i lokalizacją sejsmografów instalowanych przez kolejne misje *Apollo* (wg Jaumanna i in., 2012 uzupełniony przez autorów o lokalne źródła topienia płaszczu górnego dostarczające magmy wylewającej się na powierzchnię i krzepnącej w obniżeniach tworząc bazalty mórz księżycowych; rysunek wykonała J. Przylibska)

Fig. 2. Cross-section through the Moon with the main components: inner core, outer core, mantle, and crust, as well as marked moonquake hypocentres and the location of seismographs installed by successive *Apollo* missions (acc. to Jaumann et al., 2012, supplemented by us with local sources of upper mantle melting, supplying magma pouring onto the surface and solidifying in depressions, creating the basalts of the lunar maria; drawing by J. Przylibska)

jednocześnie pozwalając na utrzymywanie się osłabionego pola magnetycznego aż do ok. 2,5 mld lat temu. Sugeruje to, że dynamo było zasilane przez co najmniej dwa różne mechanizmy działające podczas wczesnej i późnej historii Księżyca (Tikoo i in., 2017).

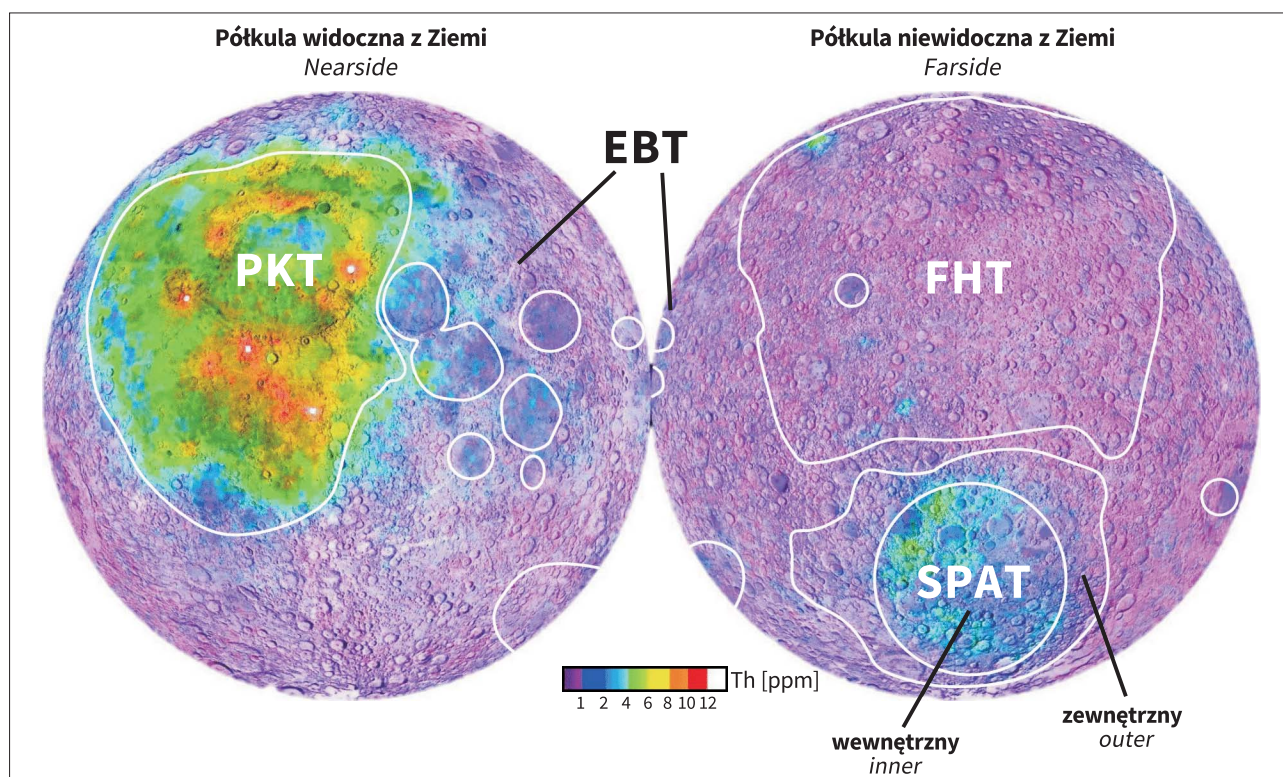
Warunki atmosferyczne na Księżycu są takie, jakie panują w przestrzeni międzyplanetarnej. Niemniej jednak 10^5 – 10^7 cząsteczek (pochodzących z wiatru słonecznego, rozpylanych z powierzchni, a także pochodzących z rozpadu izotopów promieniotwórczych w skałach i regolicie, np. He, Ar, Rn) lub łącznie 10^4 kg gazu znajduje się w neutralnej księżycowej „atmosferze” (Jaumann i in., 2012).

Rozwój i budowa skorupy

Księżyc jest ciałem, którego skorupę stanowi jedna płyta, która była poddana tylko niewielkiemu wewnętrznemu stressowi. Obszary wyżynne Srebrnego Globu stanowią unikalny w Układzie Słonecznym przykład ciała pokrytego pierwotną skorupą uformowaną przez krystalizującą z oceanu magmy anortozyty (Taylor, McLennan, 2010). Mimo że w ewolucji Księżyca nie występowała tektonika płyt, skorupa księżycowa i leżący pod nią płaszcz są podzielone na odrębne terrany, które posiadają unikalne właściwości geochemiczne, geofizyczne i geologiczne. Koncentracja pierwiastków promieniotwórczych, produkujących ciepło w procesach przemian promieniotwórczych, na widocznej półkuli Księżyca, na obszarze terranu Procellarum KREEP (PKT – *Procellarum KREEP Terrane*), najwyraźniej doprowadziła to do tego, że widoczna strona Księżyca jest bardziej aktywna wulkanicznie niż

półkula niewidoczna z Ziemi. Datowanie bazaltów wykazało, że wulkanizm księżycowy był aktywny przez prawie 3 mld lat, zaczynając od ok. 3,9–4,2 mld lat temu i kończąc na 1,0 mld lat temu (Jaumann i in., 2012). W obrębie PKT występują bazalty o zwiększonej zawartości Th w granicach 3–12 ppm. Terran ten obejmuje swym zasięgiem Ocean Procellarum (Ocean Burz) oraz Morze Imbrium (Morze Deszczów). Największym księżycowym terranem jest *Feldspathic Highlands Terrane* (FHT), zajmujący ok. 60% powierzchni Księżyca. Głównymi skałami w tym terranie są anortozyty wzbogacone w żelazo. Skały te wykazują charakterystyczne dla skał skorupy zawartości Th, od poniżej 1 do ok. 2–3 ppm. Wylewy law bazaltowych na obszarze FHT miały miejsce głównie w okresie Imbrian i były niewielkie (Jaumann i in., 2012). Trzecim dużym terranem jest najstarszy i największy ze wszytkich księżycowych basenów – *South Pole-Aitken* (SPA). Poza tymi trzema dużymi terranami opisano także czwarty terran – *Eastern Basin Terrane* (Terran Basenu Wschodniego) (Jaumann i in., 2012). Zasięg poszczególnych terranów przedstawiono na rycinie 3.

Skorupa księżycowa składa się z czterech głównych typów skał pod względem zróżnicowania geochemicznego oraz będących wynikiem mechanicznego niszczenia i mieszania składników mineralnych. Pierwszym typem są skały budujące obszary wyżynne. Są nimi skały magmowe głębinowe – bogate w żelazo anortozyty, stanowiące 80% skorupy wyżyn księżycowych. Są to skały prawie monomineralne utworzone z plagioklastu wapniowego o składzie niemal czystego anortytu (An_{95} – An_{97}), w których występują kryształy ubogiego w magnez (kosztem Mg wzboga-



Ryc. 3. Zasięg terranów księżycowych wyznaczonych na podstawie zawartości Th i FeO w skałach skorupy; dla uproszczenia pokazano granice wyznaczonych terranów tylko na tle zawartości Th; PKT – Procellarum KREEP Terrane (Terran Procellarum KREEP), FHT – Feldspathic Highlands Terrane (Terran Skaleniowych Wyżyn), SPAT – South Pole – Aitken Terrane (Terran Bieguna Południowego – Aitken), EBT – Eastern Basin Terrane (Terran Basenu Wschodniego) (wg Jaumanna i in., 2012)

Fig. 3. Range of lunar terranes determined on the basis of Th and FeO contents in crustal rocks; for simplicity, the boundaries of the terranes designated are shown only against the background of the Th content; PKT – Procellarum KREEP Terrane, FHT – Feldspathic Highlands Terrane, SPAT – South Pole – Aitken Terrane, EBT – Eastern Basin Terrane (acc. to Jaumann et al., 2012).

conego w Fe) piroksenu. Mają one strukturę grubokrystaliczną i teksturę kumulatową. Ich cechą charakterystyczną jest wzbogacenie w europ, przy jednoczesnym zubożeniu w pozostałe pierwiastki ziem rzadkich (REE). Wiek ich krystalizacji z oceanu magmy oceniany jest na $4,460 \pm 0,400$ mld lat (Greeley, Batson, 1999; Taylor, McLennan, 2010; Jaumann i in., 2012). W obrębie pierwotnej skorupy występują także skały KREEP. Powstały one w wyniku krystalizacji stopu rezydualnego, stanowiącego ok. 2% pierwotnej magmy. Ten stop resztkowy zawierał szczególnie dużą ilość pierwiastków śladowych niedopasowanych (do struktur minerałów skałotwórczych: oliwinów, ortopiroksenów, klinopiroksenów, plagioklazów i ilmenitu). Skały KREEP były ostatnim produktem krystalizacji oceanu magmy. Są silnie wzbogacone w REE – tysiącrotnie w stosunku do CI, są wzbogacone w potas i fosfor, a także w uran i tor. Wiek tych skał określany jest na ok. 4,36 mld lat. Skały te tylko sporadycznie występują na niewidocznej półkuli Księżyca. Skały KREEP nie występują w formie warstwy ciągłej, a tworzą soczewy (*lens*) i strąki (*pod*) (Greeley, Batson, 1999; Taylor, McLennan, 2010; Jaumann i in., 2012). Ostatnią formację magmowych skał głębinowych stanowią skały facji magnezowej (*Mg-suite*). Skały te stanowią maksymalnie ok. 10% skorupy Księżyca. Występują na stronie widocznej. Są one przestrzennie związane ze skałami KREEP i stanowią prawdopodobnie produkt krystalizacji magmy będącej mieszaniną magmy KREEP z inną, bardziej pierwotną magmą. Wśród tych skał wyróżniamy troktolity, troktolity spinelowe, noryty, gabronoryty i dunity. Skały te zawierają ortopirokseny bogate w Mg, co odróżnia je od bazaltów mórz księżycowych. Ich wiek wynosi 4,44–4,2 mld lat (Greeley, Batson, 1999; Taylor, McLennan, 2010; Jaumann i in., 2012).

Drugim typem skał budujących młodszą, wtórną skorupę Księżyca są bazaltowe skały wulkaniczne wzbogacone w FeO i TiO₂ i zubożone w Al₂O₃, które tworzą obszary mórz księżycowych. Wśród tych skał można wyróżnić potoki lawowe o długości dochodzącej do 1200 km i typowej miąższości 10–40 m oraz sporadycznie spotykane osady piroklastyczne. Bazalty mórz zawierają większe ilości oliwinu i/lub piroksenu, zwłaszcza klinopiroksenu, natomiast mniej plagioklazów. Morza zajmują ok. 17% powierzchni Księżyca i znajdują się przeważnie na stronie widocznej z Ziemi. Jednak miąższość pokrywy bazaltowej waha się w granicach od kilkuset metrów do 4 km w centrach okrągłych mórz, np. Mare Imbrium. Zwykle pokrywa bazaltowa jest cieńsza niż 500 m. Niektóre morza (tzw. cryptomaria) są pokryte materiałem wyrzuconym z wielopierścieniowych kraterów. Nie ma śladów wulkanów tarczowych, morza bazaltowe są płaskie – w odległości rzędu 500 km deniwelacje terenu osiągają zaledwie do 150 m. Wynika to z bardzo obfitych erupcji i bardzo małej lepkości lawy. Ocenia się, że jej lepkość była 10-krotnie mniejsza niż bazaltów ziemskich i można ją porównać do lepkości oleju silnikowego w temperaturze pokojowej. Bazalty mórz księżycowych pochodzą z niezależnych erupcji z różnych źródeł na różnych głębokościach i zalewają (wypełniają) najbliższe dostępne obniżenia terenu. Dowodem na to jest nie wypełnienie bazaltem basenu Bieguna Południowego – Aitken. Dowodzi to także, że źródłem magm są lokalne strefy w płaszczu Księżyca nie związane ze strukturami powierzchniowymi. Brak mórz bazaltowych na niewidocznej półkuli wynika z większej grubości skorupy. Większość księżycowych bazaltów jest produktem częściowego wytopienia nietoleitowego, bez-

wodnego obszaru źródłowego bazaltu zlokalizowanego na różnych głębokościach (rzędu 200–400 km) w temperaturze ok. 1200°C. Topienie jest prawdopodobnie powodowane lokalnymi koncentracjami izotopów promieniotwórczych U, Th i ⁴⁰K. Rozproszone źródła magm bazaltowych powodują ich znaczne zróżnicowanie pod względem składu chemicznego i mineralnego. Znany obecnie ok. 25 rodzajów bazaltów księżycowych. Wynika to również z krystalizacji frakcyjnej przy powierzchni, ale też niewątpliwie ze zróżnicowania składu płaszczu. Wiek najstarszych bazaltów szacuje się na 4,3–3,9 mld lat. Są to skały bogate w Al₂O₃ i ubogie w tytan (*aluminous low-Ti basalts*). Bazalty ubogie w potas występujące w rejonie *Mare Tranquillitatis* (Morze Spokoju) mają wiek $3,86 \pm 0,03$ mld lat. Bazalty ilmenitowe mają wiek $3,08 \pm 0,05$ mld lat, natomiast najmłodsze, rzadko występujące bazalty mają zaledwie 1 mld lat. W składzie bazaltów występują pirokseny i oliwiny bogate w Mg, plagioklasy wapniowe oraz ilmenit. Cechą charakterystyczną jest znaczny stopień redukcji związany z 10⁶ razy mniejszą zawartością tlenu w stosunku do bazaltów ziemskich. W porównaniu do ziemskich bazaltów księżycowe są zubożone w SiO₂ (zawierają 37–45%), wzbogacone natomiast w FeO (zawierają 18–22%), są także wzbogacone w Ti, Cr, a stosunek K/U wynosi 2500, tj. ponad 4 razy mniej niż w bazaltach ziemskich (10 000–12 500). Spotkano także odmiany wezykularne, w których gazem był prawdopodobnie CO. Całkowita objętość bazaltów mórz księżycowych jest szacowana na $1,8 \cdot 10^7$ km³ (Greeley, Batson, 1999; Taylor, McLennan, 2010; Jaumann i in., 2012).

Około 99% powierzchni Księżyca stanowią skały starsze niż 3 mld lat i ponad 80% skały starsze niż 4 mld lat (Taylor, McLennan, 2010).

Kolejne dwa typy skał są związane z procesami egzogenicznymi działającymi na powierzchni Księżyca. Do nich należy trzeci typ skał skorupy Księżyca, którym są brekcje klastyczne powstałe w wyniku jednego lub wielu uderzeń meteoroidów i asteroid w powierzchnię Księżyca tworzące mieszaninę różnych typów skał. Najsilniejszego bombardowania Księżyc doświadczył pomiędzy kolizjami Nectaris (3,95 mld lat) a Imbrium (3,85 mld lat). Wśród brekcji należy wymienić brekcje monomiktyczne, dimiktyczne i polimiktyczne. Dzielone są one następnie na zderzeniowe brekcje stopowe – *impact melt breccia*, szkliste brekcje stopowe – *glassy melt breccia*, brekcje fragmentaryczne – *fragmental breccia*, ubogie w klasty brekcje stopowe – *clast-poor impact melts*, oraz brekcje regolitowe – *regolith breccia* (Taylor, McLennan, 2010). Występują także termicznie zmetamorfizowane brekcje granulitowe (po polsku właściwie powinny być nazwane granularnymi). Charakteryzują się one ziarnistą (granularną) teksturą, od której wywodzi się ich nazwa. Niekiedy wykazują ślady częściowego topienia lub nawet charakteryzują się magmową (poikilitową) strukturą i mogą być produktem zderzeń (*impact melts*) (Taylor i in., 2017).

Powierzchnię skorupy księżycowej stanowi czwarty typ skał skorupy Księżyca – nieskonsolidowana warstwa drobnoziarnistego gruzu zwana regolitem (gruntem księżycowym), który zawiera krystaliczne fragmenty skał i minerałów połączone ze sobą szklivem produkowanym w czasie uderzeń mikrometeoroidów (brekcje regolitowe) (Jaumann i in., 2012). Miąższość regolitu zawiera się w przedziale 2–14 m, choć zdarzają się jego lokalne nagromadzenia, w których warstwa regolitu przekracza 14 m miąższości (Papike i in., 1982; Jin i in., 2010). Przeciętna średnica

cząstek regolitu wynosi ok. 60–80 μm , a w składzie dominują okruchy minerałów, fragmenty niezmiennych skał krystalicznych, fragmenty brekcji, szkliska oraz aglutynaty – zlepione szkliskiem okruchy skał i minerałów. Występuje także materiał meteorytowy, który może stanowić do 2% objętości regolitu (Melosh, 2011; 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, a także promieniowania UV oraz rentgenowskiego. Na powierzchni gęstość regolitu wynosi 1400 kg/m^3 , ale już na głębokości 1 m wzrasta do 2000 kg/m^3 . W składzie regolitu dominuje materiał miejscowy, ale ok. 10% regolitu stanowią cząstki (*ejecta*) przetransportowane z dużych odległości przez silne zderzenia planetoid (asteroid) i meteoroidów z powierzchnią Księżyca (Melosh, 2011; Jaumann i in., 2012; Kallio i in., 2019). Ocenia się, że regolitu przybywa na powierzchni Księżyca w tempie ok. 1,5 mm na 1 mln lat (Taylor, McLennan, 2010). Przekrój przez regolit księżycowy przedstawia rycina 4.

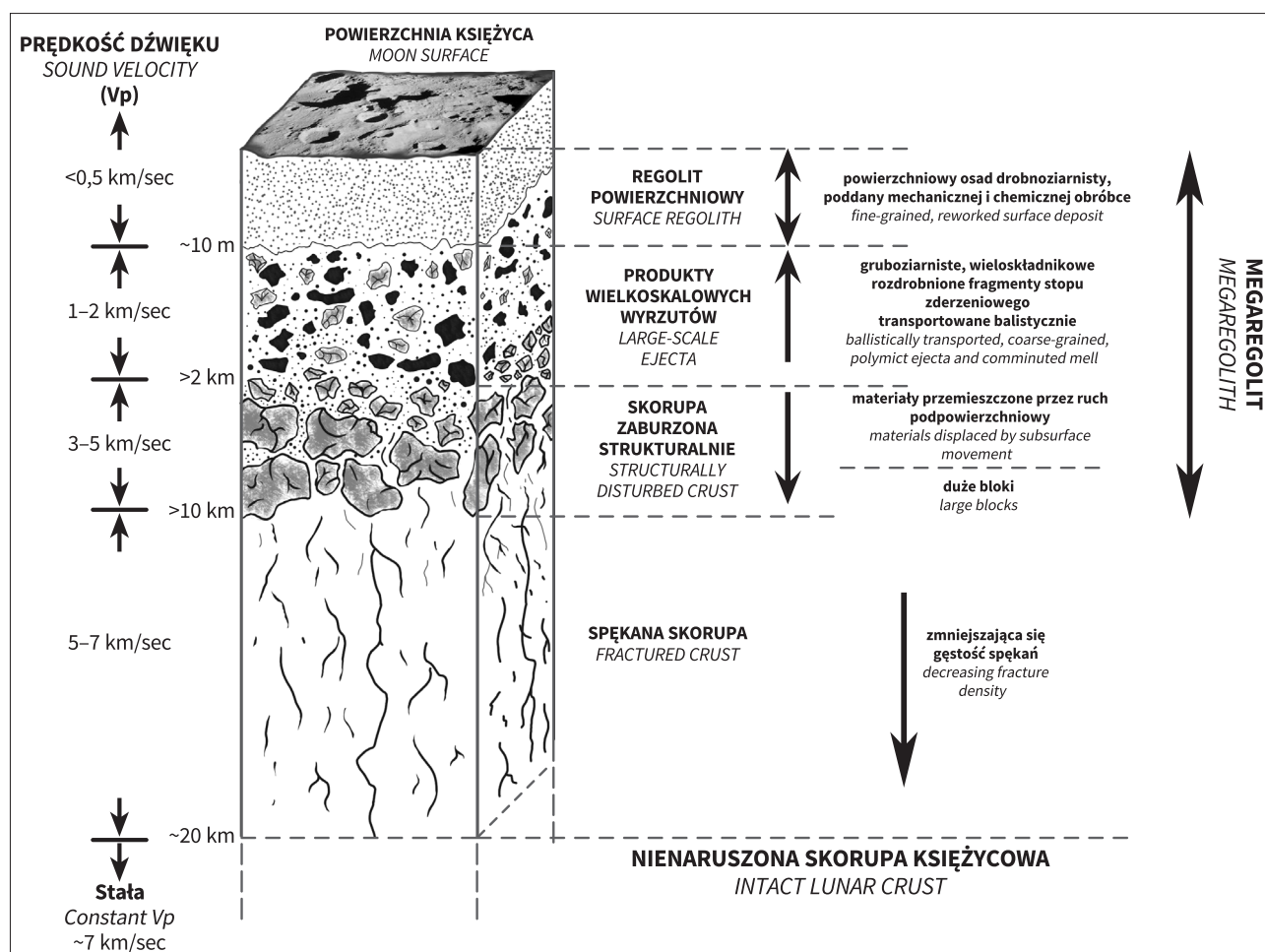
Stratygrafia

Obecny stan wiedzy na temat ewolucji skorupy księżycowej pozwala na wydzielenie trzech podstawowych faz (eonów), w których to procesy egzogeniczne i endogeniczne odegrały różne role w kształtowaniu skorupy Księżyca. Pierwsza faza (Eolunarian) obejmuje krzepnięcie oceanu

magmy, a dominującymi procesami były wówczas procesy endogeniczne. W okresie tym z oceanu magmy krystalizowały anortozyty, skały KREEP i skały facji magnezowej. W fazie drugiej (Paleolunarian) procesy endogeniczne (głównie magmatyzm – plutonizm – krystalizacja magmy resztkowej i wulkanizm – erupcje bazaltów wypełniających morza księżycowe) i egzogeniczne (zderzenia z różnej wielkości meteoroidami i asteroidami) miały podobny wymiar. Wraz ze stygnięciem wnętrza Księżyca skala procesów endogenicznych znacznie się zmniejszyła (rzadko występujące wylewy law bazaltowych), dzięki czemu w kształtowaniu powierzchni coraz większą rolę odgrywały procesy egzogeniczne, których efektem było powstawanie kraterów i pokryw osadów tworzonych przez wyrzucany z nich materiał (Greeley, Batson, 1999; Ji i in., 2022). Okres ten obejmuje fazę trzecią (Neolunarian), która trwa do dziś. Uproszczony podział chronostratygraficzny przedstawia tabela 2. Zawiera ona nie tylko fazy ewolucji Księżyca, ale również okresy i najważniejsze wydarzenia geologiczne (Ji i in., 2022).

Geologia powierzchni

Utwory geologiczne występujące na powierzchni Księżyca można podzielić na formacje, które powstały w procesach endogenicznych, a więc głównie w początkowych okresach formowania się i ewolucji oraz wskutek procesów egzogenicznych, których mechanizmem napędowym są zderzenia ciał kosmicznych z powierzchnią Księżyca.



Ryc. 4. Przekrój przez regolit Księżyca (rysunek wykonała J. Przylibska, na podstawie Jaumanna i in., 2012)

Fig. 4. Moon regolith cross-section (drawing by J. Przylibska, based on Jaumann et al., 2012)

Tab. 2. Tabela chronostratygraficzna Księżyca (wg Ji i in., 2022)
Table 2. The Moon chronostratigraphic chart (after Ji et al., 2022)

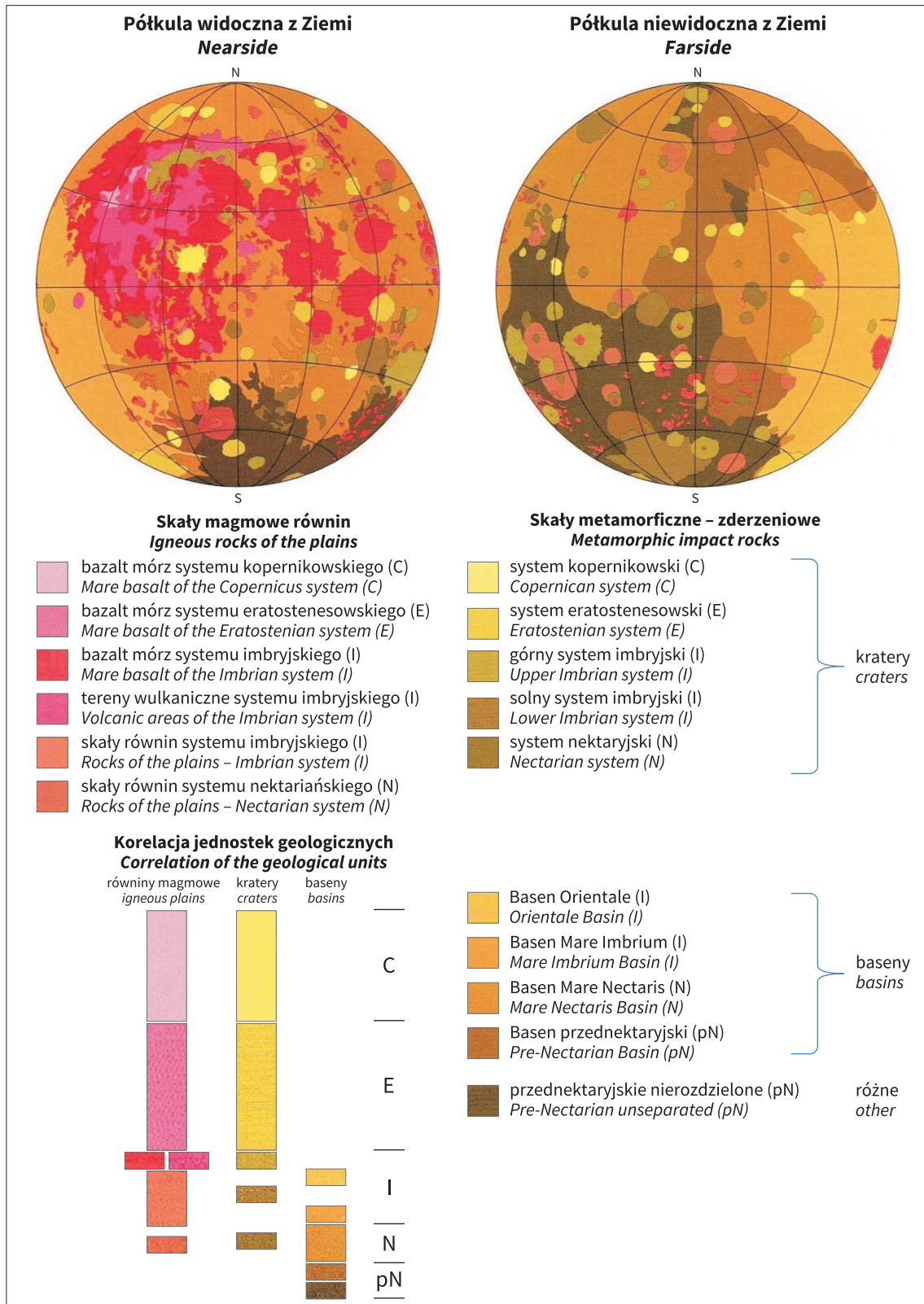
Eon <i>Eon</i>	Okres <i>Period</i>	Wiek [mld lat] <i>Age</i> [Ga]	Jednostki stratygraficzne <i>Stratigraphic</i> <i>units</i>	Wydarzenia geologiczne <i>Geological events</i>	Procesy endogeniczne/ egzogeniczne <i>Endogenous/exogenous</i> <i>processes</i>
Neolunarian	Copernican	0,80 – obecnie <i>present</i>	materiał kraterowy <i>crater material</i>	uderzenia tworzące kratery mają widoczne promieniste tekstury (Copernicus, Tycho, Aristarchus i Kepler) <i>impacts to form the craters have radial textures (Copernicus, Tycho, Aristarchus, and Kepler)</i>	dominacja procesów egzogenicznych <i>exogenic processes dominated</i>
	Eratosthenian	3,16–0,80	materiał kraterowy, bazalty mórz księżycowych <i>crater material, mare basalts</i>	incydenty impaktowe i kraterowe stworzyły wyraźną morfologię, ale wszelkie promieniste tekstury są ledwie rozpoznawalne; drobne erupcje powodujące powstanie bazaltów (o dużej zawartości Ti – <i>high-Ti basalts</i>) tworzących morza księżycowe <i>impact events and the craters usually have distinct morphology but the radial textures are hardly recognizable; small amount of mare basalts were erupted and are mainly high – Ti type</i>	
Paleolunarian	Imbrian	3,85–3,16	materiał kraterowy oraz formacje basenowe; bazalty mórz księżycowych; materiał wulkaniczny <i>crater material and basin formations, mare basalts volcanic material</i>	późny Imbrian: incydenty impaktowe tworzące baseny: Comptona, Humboldta i Iridium oraz liczne kratery; masywne wylewy bazaltów od niskiej do średniej zawartości Ti; wczesny Imbrian: incydenty impaktowe tworzące baseny: Antoniadi, Schrödinger, Orientale oraz liczne kratery; wulkanizm <i>late Imbrian: Impacts to form Compton, Humboldt and Iridium basins, and numerous craters. Massive flooding of mare basalts, which are mainly low – to medium Ti types; early Imbrian: Impacts to form Imbrium, Antoniadi, Schrödinger, and Orientale basins, and numerous craters; volcanism</i>	porównywalne efekty procesów endogenicznych i egzogenicznych <i>comparable effects of endogenic and exogenic processes</i>
	Nectarian	3,92–3,85	materiał kraterowy i formacje basenowe; produkty krystalizacji magmy resztkowej <i>crater material and basin formations; residual magma crystallisation products</i>	magmatyzm niezwiązany z morzami księżycowymi; wulkanizm; incydenty impaktowe tworzące 25 basenów i liczne kratery <i>non-mare magmatism and cryptomare volcanism; impacts to form 25 basin and numerous craters</i>	
	Aitkenian	4,3–3,92	materiał kraterowy i formacje basenowe; produkty krystalizacji magmy resztkowej <i>crater material and basin formations; residual magma crystallisation products</i>	incydenty impaktowe tworzące 49 basenów i liczne kratery; magmatyzm niezwiązany z morzami księżycowymi i wulkanizm (cryptomare volcanism) <i>impact incidents forming 49 basins and numerous craters; non-mare magmatism and cryptomare volcanism</i>	
Eolunarian	Magma-oceanian	>4,3	pierwotne skały skorupy Księżyca; zasoby KREEP <i>primordial crustal rocks; KREEP reservoir</i>	formowanie się skał typu KREEP; krzepnięcie pierwotnej anortozytowej skorupy księżycowej; formacja Księżyca <i>formation of the KREEP rocks; solidification of the original anorthositic lunar crust; formation of the Moon</i>	dominacja procesów endogenicznych <i>endogenic processes dominated</i>

Powierzchnia widocznej strony Księżyca jest pokryta prawie w równej mierze przez płaskie morza bazaltowe (*basaltic maria*) oraz bogate w skalenie anortozytowe wyżyny (*feldspathic highlands*). Natomiast po stronie niewidocznej dominującą formą są wyżyny (*highlands*) (Jauman i in., 2012).

Opracowane syntetycznie, uproszczone, ale dające bardzo dobry pogląd na budowę geologiczną Księżyca są mapy geologiczne widocznej i niewidocznej półkuli Srebrnego Globu (ryc. 5). Do szczegółowych analiz budowy geologicznej naszego naturalnego satelity lepiej jest jednak uży-

wać opracowanych cyfrowo map: amerykańskiej (Fortezzo i in., 2020) i najnowszej mapy chińskiej (Ji i in., 2022).

Najstarszymi formacjami występującymi na powierzchni Księżyca są te, które powstały w wyniku procesów endogenicznych. Są to bazalty mórz (*mare basalts*) o różnej zawartości tytanu (*Very Low-Ti, Low-Ti, Medium-Ti, High-Ti* oraz *Very High-Ti*) oraz formacje niezwiązane z morzami księżycowymi, takie jak: anortozyty bogate w żelazo (o wieku 4,56–4,29 mld lat), anortozyty bogate w magnez (o wieku 4,46–4,18 mld lat), noryty wzbogacone żelazem oraz skały KREEP, zawierające: potas, pierwiastki



Ryc. 5. Uproszczone mapy geologiczne Księżycza (Greeley, Batson, 1999)
Fig. 5. Simplified geological maps of the Moon taken from Greeley and Batson (1999)

ziem rzadkich i fosfor (o wieku 4,37–3,80 mld lat). Na powierzchni Księżycza znajdują się również wystąpienia czystych anortozytów, a także wychodnie skał bogatych w oliwiny oraz kopuły będące intruzjami lub ekstruzjami (wylewami) skał kwaśnych (bogatych w SiO₂) (Ji i in., 2022). Mogą one reprezentować skały granitowe o wieku

4,4–3,9 mld lat, które utworzyły się w kilku (co najmniej ośmiu) impulsach magmowych. Zawierają one bezwodne asocjacje mineralne, charakteryzuje je znaczne wzbogacenie K/Ca oraz mała zawartość REE (pierwiastków ziem rzadkich; *rare earth elements*) w stosunku do skał KREEP (Bonin, 2012).

Młodszyimi formacjami Księżyca są te, które powstały jako efekt procesów egzogenicznych. Są to przede wszystkim formacje kraterowe oraz formacje basenowe. Formacje kraterowe powstały w wyniku impaktu (zderzenia z obiektem kosmicznym – planetoidą (asteroidą) lub meteoroidem), a wygenerowana podczas uderzenia ogromna energia i ciśnienie spowodowały powstanie luźnego materiału skalnego składającego się zarówno z materiału macierzystego Księżyca, jak i niesionego przez ciało impaktowe (impaktor). Powstawanie kraterów jest najczęściej zachodzącym procesem geologicznym w obrębie księżycowej skorupy, stąd formacje te są dominującą formą charakteryzującą powierzchnię Srebrnego Globu. Materiał powstały w wyniku kraterowania powierzchni Księżyca występuje w postaci pięciu facji: wzniesienia (wyniesienia) centralnego położonego w środku krateru (*central peak*), podłoża, dna krateru (*floor*), ścian, zboczy krateru (*wall*), materiału wyrzuczonego z krateru, który deponowany jest od krawędzi krateru (*continuous ejecta*) oraz materiału wyrzuczonego poza krater, na dużą odległość, tak że pozostaje bez kontaktu z macierzystym kraterem (*discontinuous ejecta*). Należy zaznaczyć, że wzniesienie centralne (*central peak*) pojawia się jedynie w kraterach o średnicy ponad 15 km (Ji i in., 2022).

Formacje basenowe są podstawową formacją geologiczną na Księżycu, a większość z nich datowana jest na ok. 4,3–3,88 mld lat. W przypadku formacji basenowych wyróżnia się sześć facji: wzniesienia (wyniesienia) centralnego położonego w środku krateru (*central peak*), okręgów wokół wzniesienia centralnego (*peak-ring*), podłoża, dna basenu (*basin-floor*), ścian, zboczy basenu (*basin-wall*), obwódki na obrzeżu basenu (*basin-rim*) i materiału wyrzuczonego z basenu w wyniku zderzenia, impactu (*basin-ejecta*) (Ji i in., 2022).

SKAŁY KSIĘŻYCOWE DOSTĘPNE DO BADAŃ NA ZIEMI

Obecnie na Ziemi znajduje się niemal 1,5 t skał i regolitu Księżyca (Przylibski i in., 2023; por. tab. 3). Większa część masy tej materii jest dostępna do badań. Źródłami skał księżycowych na Ziemi są przede wszystkim meteoryty, których łącznie mamy sklasyfikowanych już ponad tonę, a pozostałą część stanowią próbki przywiezione przez załogowe misje amerykańskie programu *Apollo* oraz przez

Tab. 3. Zestawienie mas skał księżycowych dostępnych do badań na Ziemi (Orloff, 2004; Hu i in., 2021; Bell i in., 2022; MetBull, 2023)

Table 3. A list of lunar rock masses available for study on Earth (Orloff, 2004; Hu et al., 2021; Bell et al., 2022; MetBull, 2023)

Skaly księżycowe <i>Moon rocks</i>	Masa <i>Mass</i> [g]	Procent masy całkowitej <i>Percentage of total mass</i>
Meteoryty <i>Meteorites</i>	1 020 995	72,68
Program <i>Apollo</i> <i>Apollo program</i>	381 720	27,18
Program <i>Luna</i> <i>Luna program</i>	326	0,02
Misja <i>Chang'e</i> <i>Chang'e mission</i>	1731	0,12
SUMA <i>SUM</i>	1 404 772	100,00

misje bezzałogowe sowieckiego programu *Luna* i ostatnio chińskiej misji *Chang'e* (Przylibski i in., 2023; por. tab. 3). Mimo że meteoryty księżycowe są znajdowane na Ziemi od 1960 r., to jednak ich rozpoznanie jako skał księżycowych było możliwe dzięki porównaniom z próbkami skał i regolitu przywiezionymi ze Srebrnego Globu. Dlatego też meteoryty księżycowe były rozpoznawane, charakteryzowane i klasyfikowane od roku 1980 (Przylibski i in., 2023). W tabeli 3 zestawiono źródła materii księżycowej na Ziemi i ich obfitość. Na rysunku 6 przedstawiono miejsca lądowania misji *Apollo*, *Luna*, *Chang'e* i *Chandrayaan*. W ramach trzech pierwszych zostały pobrane próbki skał i regolitu, które następnie przetransportowano na Ziemię. Należy podkreślić, że dzięki wyprawom organizowanym w celu poszukiwania meteorytów, przede wszystkim na gorących pustyniach Afryki, Półwyspu Arabskiego i Australii, a także zimnych pustyniach Antarktydy, do zasobów instytucji naukowych trafia w coraz szybszym tempie coraz większa liczba okazów meteorytów księżycowych (lunaitów). Szczególnie szybki przyrost liczby i masy meteorytów z Księżyca obserwujemy od roku 2015 (Przylibski i in., 2023). Dzięki temu spadają ceny skał księżycowych na giełdach i w sklepach internetowych, co powoduje coraz bardziej powszechny i łatwiejszy dostęp do materiału badawczego.

Mechanizmem odpowiedzialnym za dostarczanie fragmentów skał księżycowych na powierzchnię Ziemi są zderzenia meteoroidów i planetoid (asteroid) z powierzchnią Srebrnego Globu. Prędkość ucieczki skał wybijanych przez uderzenia meteoroidów i planetoid w powierzchnię Księżyca wynosi 2,4 km/s. Oszacowano, że ok. 97% materiału skalnego wyrzuczonego 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 wyrzuczonych z powierzchni Księżyca przez zderzenia, których efektem było powstanie kraterów mniejszych niż 10 km średnicy (Warren, 1994). Na podstawie analizy czasu wyrzutu materii skalnej, którą obecnie posiadamy na Ziemi jako meteoryty księżycowe (lunaity), ustalono, że zderzenia produkujące tę materię meteorytową na powierzchni Księżyca miały miejsce co najmniej 3-krotnie na obszarach wyżyn oraz 5-krotnie na obszarach mórz księżycowych (Eugster i in., 2006). Udało się ustalić, że brekcje z obszarów wyżyn mają wiek wyrzutu z powierzchni Księżyca rzędu 60 tys. lat, a starsze epizody na tych obszarach miały miejsce ok. 250–300 tys. lat temu oraz 8 ± 3 mln lat temu. Natomiast bazalty mórz księżycowych oraz skały z pogranicza mórz i wyżyn księżycowych były wyrzucane z powierzchni Srebrnego Globu w czasie pięciu zderzeń, które zachodziły: mniej niż 40 tys. lat temu, od 110 do 50 tys. lat temu, od 350 do 100 tys. lat temu, a także $1,0 \pm 0,2$ i 3 ± 1 mln lat temu (Eugster i in., 2006).

W tabeli 4 przedstawiono typy skał księżycowych reprezentowane przez sklasyfikowane meteoryty księżycowe. Wśród nich dominują brekcje skaleniowe (niemal 50% wszystkich meteorytów księżycowych) oraz anortozyty (13,6%). Bazalty oraz brekcje bazaltowe stanowią jedynie odpowiednio 4,4% oraz 4,1%. Dla 17,2% meteorytów księżycowych nie określono, jakiego typu są skałami, natomiast pozostałe typy skał stanowią łącznie jedynie 11,1%. Jediną wadą tych próbek skał Księżyca jest to, że nie znamy dokładnego miejsca, z którego pochodzą. Niemniej

Tab. 4. Liczba okazów i masa meteorytów reprezentujących skały Księżyca zidentyfikowane i sklasyfikowane oraz dostępne do badań na Ziemi (na podstawie MetBull, 2023)

Table 4. Number of specimens and mass of meteorites representing lunar rocks identified and classified and available for study on Earth (based on MetBull, 2023)

Typ Type	Liczba Number	Masa Mass [g]
Brekcja skaleniowa <i>Feldspathic breccia</i>	291	681 840,2
Anortozyt <i>Anorthosite</i>	80	77 330,9
Brekcja fragmentaryczna <i>Fragmental breccia</i>	26	109 378,5
Bazalt <i>Basalt</i>	24	22 014,7
Brekcja bazaltowa <i>Basaltic breccia</i>	20	5 179,9
Brekcja ze stopionym materiałem tworzącym matrix <i>Breccia with melted material forming the matrix</i>	16	36 651,0
Gabro <i>Gabbro</i>	11	13 415,1
Anortozyt troktolityczny <i>Troctolitic anorthosite</i>	5	7 816,7
Bazalt/anortozyt <i>Basalt/anorthosite</i>	3	62,2
Troktolit <i>Troctolite</i>	3	132,3
Brekcja bazaltowo-gabrowa <i>Basalt/gabbro breccia</i>	2	556,2
Przetopiona skała pochodząca z troktolitu <i>Melt breccia derived from troctolite</i>	2	456,7
Noryt <i>Norite</i>	1	633,0
Gabro oliwinowe <i>Olivine-bearing gabbro</i>	1	2 440,0
Gabronoryt oliwinowy <i>Olivine-bearing gabbro/norite</i>	1	1 267,0
Nieokreślony <i>Undefined</i>	101	61 820,3
SUMA <i>SUM</i>	587	1 020 994,7

jednak dzięki orbitalnym badaniom geochemicznym z wykorzystaniem spektrometru gamma do analizy zawartości Fe, Ti oraz Th można już wskazywać rejony, z których mogą pochodzić poszczególne typy skał księżycowych reprezentowane przez meteoryty (Calzada-Diaz i in., 2015).

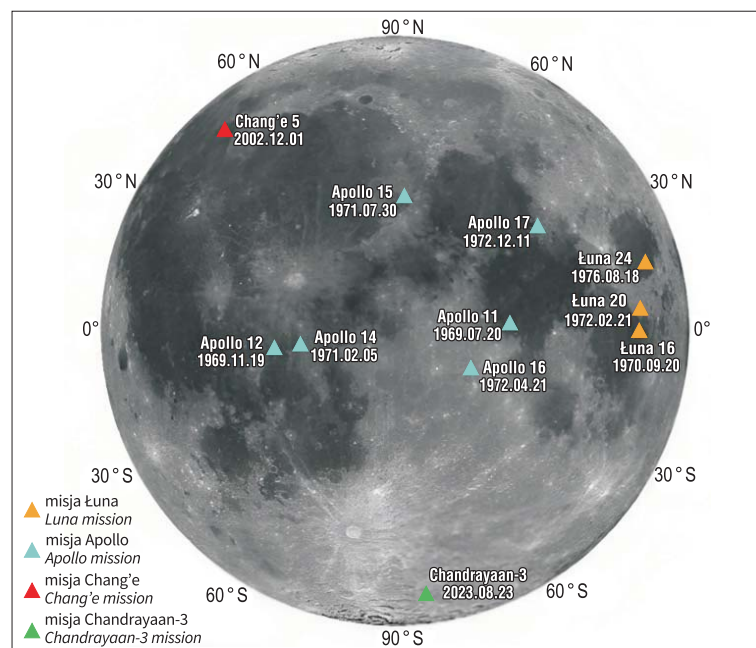
Natomiast skały przywiezione przez misje kosmiczne mają tę zaletę, że znamy dokładnie miejsce na Księżycu, z którego zostały pobrane (ryc. 6). Astronaucci misji *Apollo 11* dostarczyli na Ziemię próbki bazaltu o wysokiej koncentracji TiO_2 , anortozytu oraz regolitu zawierającego skalenie. Skały przywiezione przez misję *Apollo 12* to w większości 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). Po raz pierwszy także dostarczono na Ziemię bazalty KREEP (wzbogacone w potas, pierwiastki ziem rzadkich oraz fosfor). Kolejna amerykańska ekspedycja, której sukcesem było przywiezienie prób skał księżycowych, to misja *Apollo 14*. Dostarczyła ona na Ziemię fragmenty brekcji oraz stopów impaktowych (*impact melts*) o składzie bazaltów KREEP. Pobrane próbki regolitu składały się głównie z brekcji impaktowych, bazaltów oraz anortozytów troktolitycznych. Astronaucci misji *Apollo 15* zebrali próbki skał takich jak: anortozyty, granulity, bazalty KREEP, stopy impaktowe (*impact melts*) oraz ultramaficzne szkliwo wulkaniczne (*ultramafic volcanic glasses*) (Hiesinger, Head, 2006; Mayer, 2012). Interesujące są próbki zebranych granulitów. Są to skały, które zostały poddane metamorfozie termicznej, tworząc ziarnistą (granularną) teksturę, od niej wywodzi się ich nazwa. Wykazują one niekiedy ślady częściowego topienia, a nawet charakteryzują się magmową (poikilitową) strukturą, świadczącą o niemal całkowitym ich przetopieniu i mogą być produktem zderzeń (*impact melts*). W dostarczonych próbkach występują zawsze jako brekcje (Taylor i in., 2017). Praktycznie wszystkie przetransportowane na Ziemię próbki księżycowe misji *Apollo 15* są produktami powstałymi podczas incydentów zderzeniowych (*impact products*). Większość z nich stanowią stopy impaktowe (*impact melts*), brekcje oraz skały o składzie anortozytów (*anorthositic rocks*). Misja *Apollo 17*, zwiędzająca cały program *Apollo*, dostarczyła na Ziemię bazalty bogate w tytan, bazalty ilmenitowe i wtrofirowe (o strukturze „szklistej”, zawierające duże ilości szkliwa wulkanicznego), a także różnego rodzaju brekcje i regolit (Hiesinger, Head, 2006; Mayer, 2012).

W ramach radzieckiego programu *Luna* jedynie trzy misje: *Luna 16*, *Luna 20* i *Luna 24*, dostarczyły na Ziemię próbki pobrane z powierzchni Księżyca. Próbki misji *Luna 16* pochodzą z obszaru morza bazaltowego i zawierają ciemnoszary regolit. Większość z nich stanowią fragmenty bazaltu bogatego w tytan oraz glin (*high-Ti basalt*, *high-Al basalt*). Jednocześnie są to najbardziej ubogie w żelazo i magnez próbki bazaltu pobrane na Księżycu. *Luna 20* przywoziła próbki regolitu anortozytowego,

←

Ryc. 6. Miejsca lądowań i poboru próbek księżycowych misji: *Apollo*, *Luna*, *Chang'e 5* (Li i in., 2022b) oraz *Chandrayaan-3*

Fig. 6. Landing and sampling sites of the lunar missions: *Apollo*, *Luna*, *Chang'e 5* (Li et al., 2022b) and *Chandrayaan-3*



który zawierał dodatkowo fragmenty granulitów, anortozytów, polimiktyczne brekcje anortozytowo-norytowo-troktolitowe, a także skały stopione podczas impaktu o składzie norytowo-bazaltowym. Ostatnia misja *Luna 24* dostarczyła drobnopiezisty regolitu mórz księżycowych. Fragmenty bazaltu z tego regolitu mają bardzo małą zawartość TiO_2 , MgO , a jednocześnie dużą koncentrację Al_2O_3 oraz FeO (Hiesinger, Head, 2006; Mayer, 2012).

Najnowsze próbki skał księżycowych zostały dostarczone na Ziemię przez chińską misję *Chang'e 5*. Zebrała ona materiał z północno-wschodniego obszaru *Oceanus Procellarum*. Są to pierwsze próbki materii księżycowej przywiezione na Ziemię po 45 latach od zakończenia amerykańskiego programu *Apollo*. W próbce regolitu znalazły się wulkaniczne klasty (głównie bazaltów), szklivo, jak również materiał okruchowy – zlepienie (scementowany materiał regolitowy – *agglutinates*), a także brekcje. Przeprowadzone analizy składu mineralnego i chemicznego wykazały, że pobrany materiał skalny charakteryzuje się małą zawartością Ti, Al, oraz K. Stwierdzony w pobranej próbce gruntu niski wskaźnik Mg oraz wysoki wskaźnik FeO może wskazywać, że zebrany materiał reprezentuje nowy rodzaj bazaltu księżycowego (Li i in., 2022b).

Na przykładzie bazaltów księżycowych (ryc. 7 i 8) doskonale widać zubożenie Księżyca w pierwiastki lotne, przede wszystkim w Na, a także w K i Ca. Bazalty księżycowe są natomiast bogatsze w Fe i Mn, a także w Ti i Cr (ryc. 8). Na diagramie klasyfikacyjnym TAS reprezentują one przede wszystkim pikrobazalt i bazalt, a także foidyt, a w mniejszej liczbie próbek stwierdzono także bazanit i bazaltowy andezyt (ryc. 7).

Uśredniony skład chemiczny bazaltów księżycowych można porównać z uśrednionymi składami bazaltów ziemskich MORB (*Mid Ocean Ridge Basalts* – bazalty budujące grzbiety śródoceaniczne) i Dekanu (ryc. 8). Wyraźnie widoczne jest wzbogacenie bazaltów księżycowych w Ti,

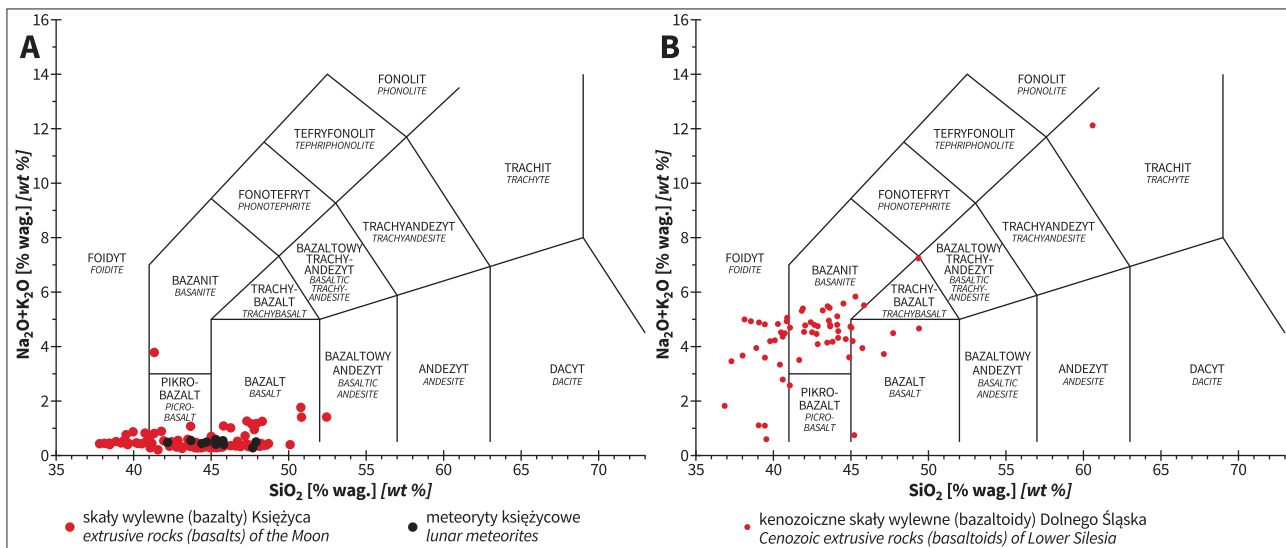
szczególnie względem MORB, a także w Fe, Mn i Cr. Bazalty księżycowe są zubożone w Al, Ca i Na względem bazaltów Dekanu i MORB (ryc. 8). Interesującą przedstawia się średnia zawartość K, która w bazaltach Księżyca jest wyraźnie mniejsza niż w bazaltach Dekanu i nieco większa niż w MORB (ryc. 8).

Anortozyty księżycowe wykazują, podobnie jak bazalty księżycowe, charakterystyczne zubożenie w Na względem anortozytów ziemskich (ryc. 9). Potwierdza to globalną ucieczkę sodu w czasie formowania się Księżyca, świadcząc o tym, że w czasie jego powstawania materia była całkowicie odparowana, a następnie ochładzając się, tworzyła ocean magmy, który po ostygnięciu utworzył pierwotną anortozytową skorupę i bardziej zasadowy płaszcz. Anortozyty skorupy Księżyca są także zubożone względem anortozytów ziemskich w Si, natomiast wzbogacone w Al i Ca względem anortozytów ziemskich (ryc. 9). Anortozyty ziemskie, których wyniki analiz chemicznych wykorzystano do konstrukcji diagramu (ryc. 9), pochodzą z Australii (rejon Mount Narryer), Grenlandii (rejon Fiskenaeset), RPA (rejon Messina), Kanady (rejon Bad Vermilion Lake) oraz z Indii (rejon Sittampundi) (Mayers, 1988; Ashwahl, 2013).

Pozostałe, najczęściej dostępne do badań skały księżycowe reprezentują przede wszystkim różne rodzaje brekcji pochodzących z przypowierzchniowej części skorupy. Są one najłatwiej dostępne zarówno dla misji księżycowych, jak i najczęściej wyrzucane są z powierzchni Księżyca, by następnie trafić na Ziemię jako meteoryty.

SKAŁY MAGMOWE DOLNEGO ŚLĄSKA JAKO POTENCJALNE ANALOGI SKAŁ KSIĘŻYCOWYCH

Przedstawiona charakterystyka skorupowego materiału księżycowego sprawia, że występujące na powierzchni i często będące przedmiotem eksploatacji skały magmowe



Ryc. 7. Diagramy klasyfikacyjne TAS (Total Alkali-Silica) przedstawiające klasyfikację: **A** – skał wylewnych (bazaltów) Księżyca na podstawie analiz próbek przywiezionych przez misje *Apollo* (opracowanie autorów; dane wg Mayera, 2012) – czerwone kropki, oraz na podstawie analiz próbek pochodzących z meteorytów księżycowych (opracowanie autorów; dane wg Koblitz, 2010) – czarne kropki; **B** – kenozoicznych skał wylewnych (bazaltoidów) Dolnego Śląska (opracowanie autorów; dane wg: Pendiasa, Maciejewskiego, 1959; Ryki, Ryki, 1966; Kozłowski, 1975; Birkenmajera i in., 2002a, b, 2004, 2007, 2011)

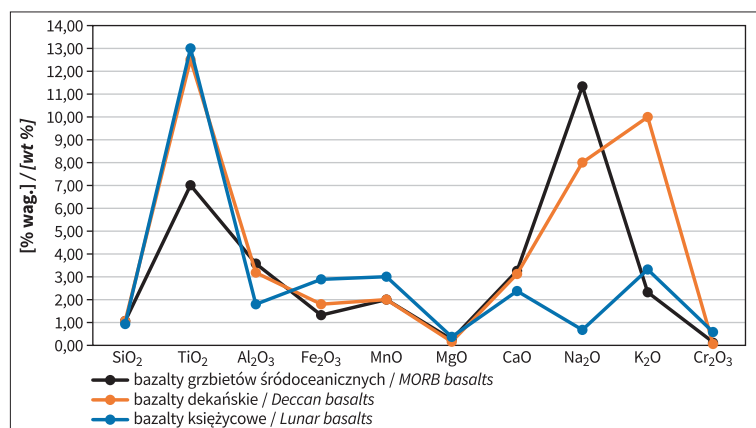
Fig. 7. TAS (Total Alkali-Silica) classification diagram showing the classification: **A** – extrusive rocks (basalts) of the Moon based on analyses of samples brought back by the *Apollo* missions (our work; data acc. to Mayer, 2012) – red dots, and based on analyses of samples from lunar meteorites (our work; data acc. to Koblitz, 2010) – black dots; **B** – Cenozoic extrusive rocks (basaltoids) of Lower Silesia (our work; data acc. to Pendias, Maciejewski, 1959; Ryka, Ryka, 1966; Kozłowski, 1975; Birkenmajer et al., 2002a, b, 2004, 2007, 2011)

Dolnego Śląska są potencjalnymi analogami skał księżycowych. Największe znaczenie wśród nich odgrywają wylewne bazaltoidy kenozoiczne oraz skały gabroidowe paleozoiku. Reprezentują one skały magmowe, które są podstawowymi składnikami skorupy Księżyca. Mogą one stanowić bazę niezbędnego materiału skalnego potrzebnego do produkcji naturalnego symulantu regolitu księżycowego. Taki produkt jest potrzebny do testowania maszyn,

ubiorów, elementów konstrukcyjnych itp., które będą wysyłane na Księżyc wraz z kolejnymi misjami załogowymi i bezzałogowymi. Ponieważ regolit stanowi materiał skalny poddany procesom metamorfizmu zderzeniowego oraz wietrzenia kosmicznego, jego analogi muszą odpowiadać nie tyle skałom macierzystym (magnowym), ale materiałowi rozdrobnionemu, zbrekcjowanemu, zlepionemu szklivem, poddanemu działaniu wiatru słonecznego. Zatem skały magmowe mogą stanowić jedynie wyjściowy materiał do produkcji naturalnego symulantu (analogu) regolitu księżycowego. Wobec specyficznych cech skał księżycowych, jak np. ich zubożenie w sód, nie jest możliwe znalezienie skał dokładnie oddających ich skład chemiczny i mineralny. Niemniej jednak można na Dolnym Śląsku wytypować skały magmowe, których skład mineralny i chemiczny będzie najbardziej zbliżony do składu skał skorupy Księżyca.

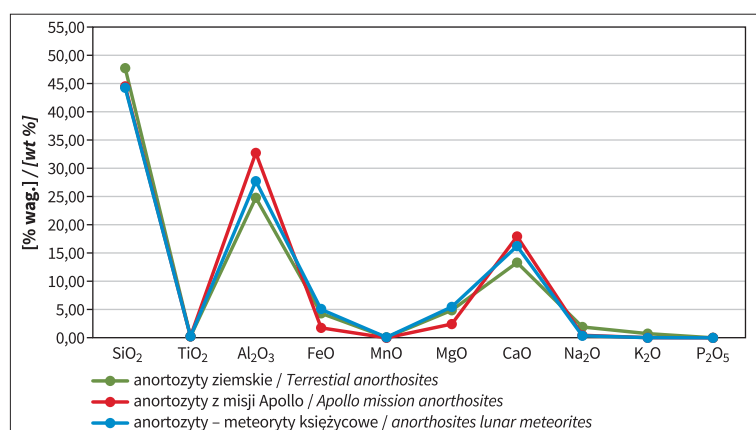
Na podstawie przeglądu dostępnych publikowanych prac i źródeł internetowych oraz baz danych autorzy przeanalizowali zawartość podstawowych składników chemicznych w różnych skałach magmowych Dolnego Śląska, które mogą być analogami skał skorupy Księżyca. Następnie wyniki tych analiz zestawili z wynikami analiz skał magmowych Srebrnego Globu wykonanych dla próbek pobranych przez misje kosmiczne i próbek pochodzących z meteorytów księżycowych. Liczbę danych, jaką autorzy wykorzystali do analiz porównawczych, przedstawiono w tabeli 5.

Z porównania diagramów TAS dla skał Księżyca i Dolnego Śląska (ryc. 7) wynika, że zgodnie z oczekiwaniami, dolnośląskie bazaltoidy są znacznie bardziej zasobne w alkalia niż bazaltoidy Księżyca. Niemniej jednak wyniki czterech analiz archiwalnych wskazują na zawartość alkaliów rzędu 1% lub mniej. Skały te są zatem najbardziej geochemicznie podobne do bazaltoidów księżycowych. Wśród nich jest jeden bazalt i trzy foidyty. Wszystkie te analizy reprezentują skały pochodzące z dwóch kamieniołomów w zachodniej części Dolnego Śląska. Są to kamieniołomy *Zaręba* i *Księginki* leżące w pobliżu Lubania (Pendias, Maciejewski, 1959; Ryka, Ryka, 1966). Analizy tych skał nie są wykonane nowoczesnymi metodami analitycznymi, mogą one być zatem obciążone dużą niepewnością. W związku z tym autorzy w dalszych badaniach planują wykonanie własnych analiz



Ryc. 8. Diagram przedstawiający skład różnych typów bazaltów znormalizowany do składu ziemskiego płaszczowego perydotytu (wg Widdowsona, 2011)

Fig. 8. Diagram normalizing basalt types against peridotite mantle composition (after Widdowson, 2011)

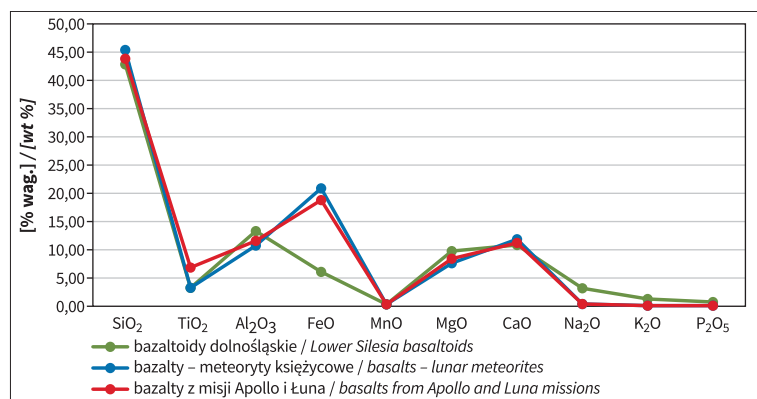


Ryc. 9. Diagram przedstawiający uśredniony skład anortozytów ziemskich (wg Mayersa, 1988; Ashwaha, 2013) w odniesieniu do uśrednionego składu anortozytów księżycowych, których wyniki analiz reprezentują próbki pobrane przez misje *Apollo* oraz próbki meteorytów (wg Koblitza, 2010; Mayera, 2012)

Fig. 9. Diagram showing the average composition of terrestrial anorthosites (acc. to Mayers, 1988; Ashwaha, 2013) in relation to the average composition of lunar anorthosites, the analytical results of which represent samples taken by *Apollo* missions and from meteorite samples (acc. to Koblitz, 2010; Mayer, 2012)

Tab. 5. Liczba analiz chemicznych skał Dolnego Śląska i Księżyca porównywanych ze sobą
Table 5. Comparative chemical analyses of rocks from Lower Silesia and the Moon

Skała / Rock	Dolny Śląsk Lower Silesia	Księżyc / Moon		
		SUMA / SUM	Misje kosmiczne Space missions	Meteoryty Meteorites
Bazaltoid / Basaltoid	68	256	224	32
Anortozyt / Anorthosite	2	57	30	27
Gabro / Gabbro	69	13	1	12
Troktolit / Troctolite	3	2	2	0



Ryc. 10. Diagram przedstawiający średnią zawartość głównych składników chemicznych w bazaltoidach Dolnego Śląska (dane wg: Pendiasa, Maciejewskiego, 1959; Ryki, Ryki, 1966; Kozłowskiego, 1975; Birkenmajera i in., 2002a, b, 2004, 2007, 2011) w odniesieniu do składu chemicznego bazaltów księżycowych pochodzących z misji kosmicznych (dane wg Mayera, 2012) oraz z meteorytów (dane wg Koblitz, 2010)

Fig. 10. Diagram showing the mean content of the main chemical components in basalts of Lower Silesia (data acc. to: Pendias, Maciejewski, 1959; Ryka, Ryka, 1966; Kozłowski, 1975; Birkenmajer et al., 2002a, b, 2004, 2007, 2011) in relation to the chemical composition of lunar basalts from space missions (data acc. to Mayer, 2012) and from meteorites (data acc. to Koblitz, 2010)

przede wszystkim dla takich skał. Umożliwi to ostateczną weryfikację skał mogących pełnić rolę analogów skał księżycowych.

Wprowadzie średni skład bazaltoidów Dolnego Śląska odbiega znacznie od średniego składu bazaltów Księżyca (ryc. 10), to jednak, jeśli weźmie się pod uwagę zakres zmienności składu chemicznego (podstawowych składników tworzących minerały skałotwórcze) skał księżycowych, okazuje się, że można na Dolnym Śląsku znaleźć bazaltoidy mało odbiegające od księżycowych. Ich skład chemiczny najbardziej będzie różnił się zawartością sodu i potasu, czyli alkaliów, ale zawartości Si, Al, Fe, czy Mg i Ca będą porównywalne (ryc. 11). Zatem największe różnice będą dotyczyły przede wszystkim składu plagioklazów.

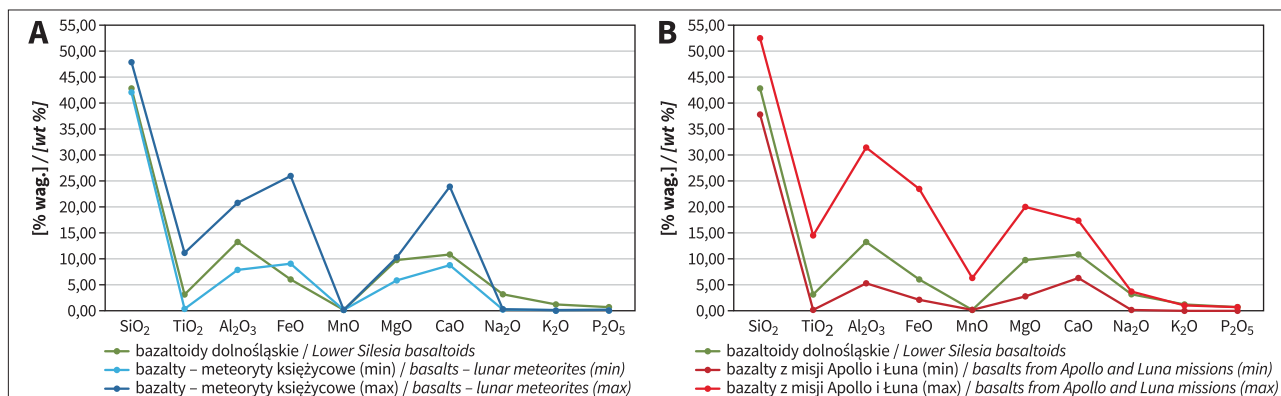
Skały magmowe głębinowe są reprezentowane na Dolnym Śląsku przez paleozoiczne gabroidy oraz granitoidy. Mimo najnowszych odkryć geologicznych na Księżycu,

dokumentujących istnienie kwaśnych skał magmowych, skały te – granitoidy – nie stanowią na tyle istotnego składnika skorupy księżycowej, aby warto było poszukiwać na Ziemi ich analogów, przynajmniej na obecnym etapie poznawania geologii Księżyca. Wśród skał gabroidowych autorzy odnaleźli wyniki analiz chemicznych skał dolnośląskich, które pozwoliły zaliczyć je do anortozytów, gabra i troktolitów (wg Pendias i Maciejewski, 1959; Borkowska, 1985; Gunia, 1992), a więc skał, które mają największy udział w budowie skorupy Księżyca (por. tab. 4). Na rycinach 12–14 przedstawiono porównanie średniego składu chemicznego tych dolnośląskich skał magmowych ze średnim składem podobnych skał magmowych skorupy Księżyca pochodzących zarówno z misji kosmicznych, jak i ze sklasyfikowanych meteorytów księżycowych.

Spośród skał skorupy Księżyca na Dolnym Śląsku na razie nie udało się zidentyfikować norytów.

Na podstawie przeglądu archiwalnych wyników analiz geochemicznych udało się zidentyfikować dwie analizy skał dolnośląskich, które zostały sklasyfikowane jako anortozyty (Pendias, Maciejewski, 1959). Obie analizowane próbki pochodzą z okolic Nowej Rudy. W porównaniu do anortozytów księżycowych jest widoczny niewielki nadmiar alkaliów i krzemionki oraz zbyt mała zawartość Ca i Fe, jak również Al (ryc. 12). Autorzy nie podważają klasyfikacji tych skał, niemniej jednak zdają sobie sprawę z tego, że przed ostatecznym wytypowaniem skał mogących pełnić rolę analogów księżycowych skał magmowych konieczne będzie wykonanie nowych analiz współczesnymi metodami analitycznymi.

Dolnośląskie gabra bardzo wyraźnie odbiegają od gabra księżycowych pod względem zawartości głównych składników chemicznych (ryc. 13). Szczególnie wyraźnie widoczne jest ich wzbogacenie w alkalia oraz Mg przy jednoczesnym zubożeniu w Ca i bardzo silnym zubożeniu w Fe.



Ryc. 11. Diagramy przedstawiające średnią zawartość głównych składników chemicznych w bazaltoidach Dolnego Śląska (dane wg Pendiasa, Maciejewskiego, 1959; Ryki, Ryki, 1966; Kozłowskiego, 1975; Birkenmajera i in., 2002a, b, 2004, 2007, 2011) w odniesieniu do: **A** – ekstremalnych zawartości tych składników w bazaltach księżycowych pochodzących z meteorytów (dane wg Koblitz, 2010) oraz **B** – ekstremalnych zawartości tych składników w bazaltach księżycowych pochodzących z misji kosmicznych (dane wg Mayer, 2012)

Fig. 11. Diagrams showing the mean content of the main chemical components in the basalts of Lower Silesia (data acc. to: Pendias, Maciejewski, 1959; Ryka, Ryka, 1966; Kozłowski, 1975; Birkenmajer et al., 2002a, b, 2004, 2007, 2011) in relation to: **A** – the extreme contents of these components in lunar basalts derived from meteorites (data acc. to Koblitz, 2010) and **B** – the extreme contents of these components in lunar basalts from space missions (data acc. to Mayer, 2012)

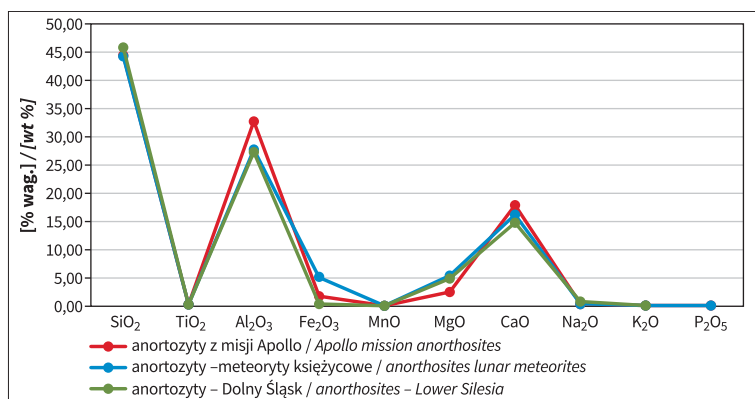
DYSKUSJA

Przedstawienie synestii jako nowego modelu wspólnego formowania się materii tworzącej skały współczesnej Ziemi i Księżyca jest podstawą do rozważań na temat poszukiwania analogów skał księżycowych na Ziemi.

Przedstawiona kompleksowa, zgodna ze współczesnym stanem wiedzy charakterystyka budowy geologicznej Księżyca pozwala wskazać zasadowe (i obojętne) skały magmowe jako materiał, do którego należy odnosić potencjalne ziemskie analogi skał księżycowych. Wśród nich niewątpliwie najważniejsze są wulkaniczne bazaltoidy oraz plutoniczne anortozyty, gabra i troktolity. Ponieważ początkowo dla misji księżycowych najważniejsze będą skały występujące bezpośrednio na powierzchni skorupy Księżyca, dlatego też materiał regolitowy najlepiej będą reprezentować wymienione skały magmowe, które zostaną poddane procesom analogicznym w skutkach do tych, jakie materiał magmowy przeszedł na powierzchni Srebrnego Globu wskutek zderzeń z planetoidami (asteroidami) i meteoroidami, a także w wyniku oddziaływania wiatru słonecznego i promieniowania kosmicznego oraz zderzeń z mikrometeoroidami i pyłem kosmicznym. W tym przypadku jako wyjściowy materiał skalny powinny być brane pod uwagę również wymienione już skały magmowe. Na Dolnym Śląsku takimi skałami magmowymi są zarówno wulkaniczne bazaltoidy kenozoiczne, jak i paleozoiczne gabroidowe skały plutoniczne.

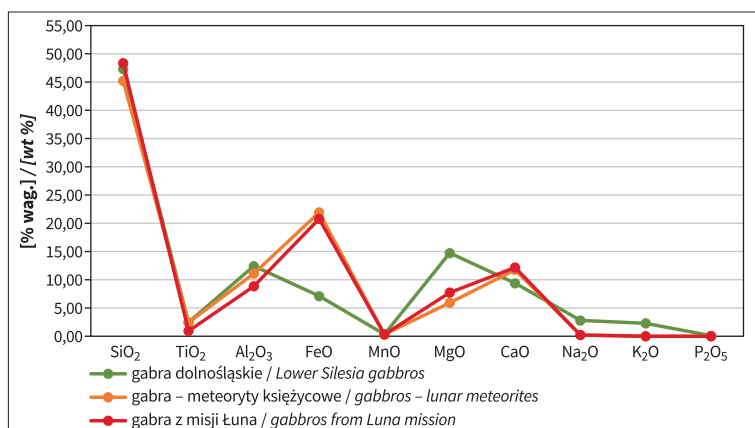
Na Dolnym Śląsku można znaleźć takie wystąpienia i złoża bazaltoidów, które będą mogły stanowić źródłowy materiał magmowy reprezentujący bazaltoidy księżycowe i być materiałem wyjściowym do produkcji naturalnego symulantu (analogu) regolitu księżycowego. Na podstawie pierwszych analiz dostępnych danych geochemicznych najlepsze, najbardziej zbliżone składem chemicznym do skał księżycowych wydają się bazalty i foidyty pochodzące z kamieniołomów *Zaręba* i *Księginki* w pobliżu Lubania. Niemniej jednak należy posiadane dane archiwalne zweryfikować. Warto także dokładniej przyjrzeć się innym wystąpieniom i złożom, także zlokalizowanym na Śląsku Opolskim. Skały te zapewne w większości przypadków będą zawierały zbyt duże ilości alkaliów, jednak nie można wykluczyć znalezienia takich bazaltoidów, które będą różniły się tylko nieznacznie zawartością podstawowych składników chemicznych od bazaltoidów księżycowych.

W odróżnieniu od dolnośląskich bazaltoidów skały plutoniczne, reprezentowane przez różne odmiany gabra (w szczególności anortozyty), znacznie wyraźniej odbiegają składem chemicznym od swoich księżycowych odpowiedników. Należy jednak wziąć pod uwagę mniejszą liczbę ich wystąpień, jak również znacząco mniejszą liczbę eksploatowanych złóż. Prawdopodobnie stwierdzenie występowania analogów plutonicznych skał księżycowych będzie



Ryc. 12. Diagram przedstawiający średnią zawartość głównych składników chemicznych w anortozytach Dolnego Śląska (dane wg Pendiasa, Maciejewskiego, 1959) w odniesieniu do składu chemicznego anortozytów księżycowych pochodzących z misji kosmicznych (dane wg Mayera, 2012) oraz ze sklasyfikowanych meteorytów księżycowych (dane wg Koblitz, 2010)

Fig. 12. Diagram showing the mean content of the main chemical components in the anorthosites of Lower Silesia (data acc. to Pendias, Maciejewski, 1959) in relation to the chemical composition of lunar anorthosites from space missions (data acc. to Mayer, 2012) and classified lunar meteorites (data acc. to Koblitz, 2010)

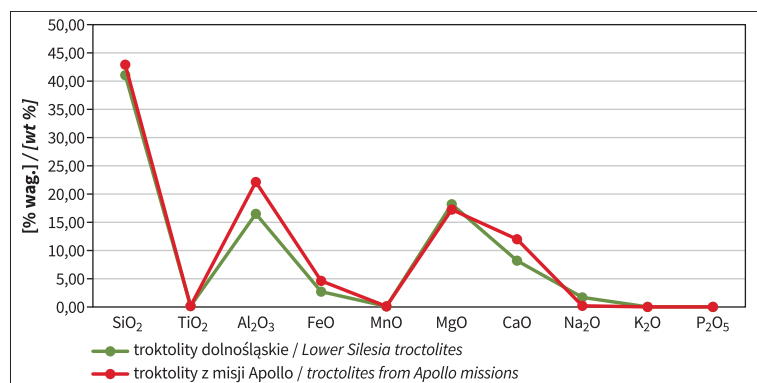


Ryc. 13. Diagram przedstawiający średnią zawartość głównych składników chemicznych w gabrach Dolnego Śląska (dane wg Pendiasa, Maciejewskiego, 1959; Ryki, Ryki, 1966; Borkowskiej, 1985; Jamrozika, 1989; Guni, 1992; Floyd i in., 2002; Wojtulka i in., 2022) w odniesieniu do składu chemicznego gabra księżycowych pochodzących z misji kosmicznych (dane wg Mayera, 2012) oraz ze sklasyfikowanych meteorytów księżycowych (dane wg Koblitz, 2010)

Fig. 13. Diagram showing the mean content of the main chemical components in Lower Silesia gabbros (data acc. to Pendias, Maciejewski, 1959; Ryka, Ryka, 1966; Borkowska, 1985; Jamrozik, 1989; Gunia, 1992; Floyd i in., 2002; Wojtulka i in., 2022) in relation to the chemical composition of lunar gabbros from space missions (data acc. to Mayer, 2012) and from classified lunar meteorites (data acc. to Koblitz, 2010)

Średni skład dolnośląskich troktolitów także odbiega od składu chemicznego troktolitów księżycowych (ryc. 14). Charakterystyczna jest w skałach Dolnego Śląska mniejsza zawartość Al, Fe oraz Ca i większa zawartość alkaliów oraz Mg.

Głębinywe zasadowe skały magmowe Dolnego Śląska znacząco różnią się od ich księżycowych odpowiedników. Poza charakterystyczną większą zawartością Na i K, a także Mg, wykazują mniejszą zawartość Ca i Fe, a niekiedy też Al.



Ryc. 14. Diagram przedstawiający średnią zawartość głównych składników chemicznych w troktolitych Dolnego Śląska (dane wg Pendiasa, Maciejewskiego, 1959; Borkowskiej, 1985) w odniesieniu do składu chemicznego troktolity księżycowych pochodzących z misji kosmicznych (dane wg Mayera, 2012)

Fig. 14. Diagram showing the mean content of the main chemical components in troctolites of Lower Silesia (data acc. to Pendias, Maciejewski, 1959; Borkowska, 1985) in relation to the chemical composition of lunar troctolites from space missions (data acc. to Mayer, 2012)

na Dolnym Śląsku trudne. Dotyczy to zwłaszcza dużych wystąpień anortozytów. Niemniej jednak w kilku masywach ofiolitowych wokół kry sowiogórskiej należy przeprowadzić dodatkowe badania terenowe i analizy geochemiczne, zwłaszcza w czynnych kamieniołomach. Mogą one w sposób znaczący uzupełnić istniejące już dane (Pin i in., 1988; Floyd i in., 2002; Wojtulek i in., 2022). Może się okazać, że w niewielkich ilościach dostępne będą skały gabroidowe, które tylko w pewnym stopniu będą się różniły składem chemicznym od ich księżycowych odpowiedników. O ile niemożliwe wydaje się znalezienie skał o podobnej zawartości alkaliów, to można się jednak pokusić o próbę dotarcia do skał różniących się tylko w niewielkim stopniu zawartością pozostałych głównych składników chemicznych. Zadanie to wymaga jednak dalszych prac terenowych i badań chemicznych. Warto je jednak podjąć, gdyż stwierdzenie występowania nawet niewielkich ciał magmowych lub stref intruzji, w których skład chemiczny skał będzie zbliżony do skał księżycowych, może zapewnić surowiec niezbędny do produkcji naturalnego analogu regolitu księżycowego.

Należy zdawać sobie sprawę także z trudności znalezienia w skałach ziemskich struktur i tekstur analogicznych do tych występujących w księżycowych skałach magmowych. Jest to związane ze skrajnie różnymi warunkami krystalizacji tych skał na obu ciałach. A zatem analogia dotyczy przede wszystkim magm, z których tworzyły się te skały, a nie gotowego produktu krystalizacji, czyli skały właśnie. Zatem analogi będą i powinny być charakteryzowane przede wszystkim w odniesieniu do składu mineralnego i chemicznego skały oraz składu chemicznego minerałów. Nie można jednak zupełnie wykluczyć, że uda się stwierdzić występowanie, jeśli nie zupełnie analogicznych, to przynajmniej podobnych strukturalnie i teksturalnie skał. Na przykład tekstury fluidalne czy wezykularne w potokach lawowych powinny spełniać wymogi analogów. Prace w tym zakresie w zespole autorskim, być może w poszerzonym składzie, będą kontynuowane. Należy dodać także, że analogi skał ziemskich (dolnośląskich) nie muszą odzwierciedlać cech nie tylko strukturalno-teksturalnych, ale także bardzo dokładnie reprezentować skład chemiczny i strukturę minerałów oraz właściwości fizyczne skał i mi-

nerałów. Wynika to z faktu, że analogi będą wykorzystane przede wszystkim jako naturalny materiał skalny służący przygotowaniu przede wszystkim regolitu. Oznacza to, że z analogów będzie produkowany materiał odtwarzający bardzo drobnoziarnisty regolit oraz zawarte w nim szkliwo. W związku z tym konieczne będzie fizyczne i być może chemiczne przetworzenie skał w celu uzyskania struktury i składu regolitu.

Podjętym przez autorów tematem produkcji symulantów księżycowego regolitu nie jest nowy, a na jego zapotrzebowanie wskazują zarówno firmy produkujące go komercyjnie, jak i wielość ośrodków naukowych, które starają się produkować go we własnym zakresie z uwagi na wysokie koszty zakupu. Na przykład symulant regolitu księżycowego firmy *Space Resource Technologies* kosztuje od 6,25 do nawet 3500,00 USD za kg, w zależności od rodzaju symulantu (jaki typ skał odwzorowuje, jak dokładnie przypomina regolit księżycowy) oraz od ilości zakupionego materiału. Dodatko-

wo doliczyć należy koszt jego dostawy z USA (<https://exolithsimulants.com/collections/lunar-simulants>). Dla wielu ośrodków badawczych i przeżywających silny rozwój firm sektora kosmicznego w Polsce koszt ten stanowić może barierę nie do przebicia lub znacząco zmniejszać opłacalność realizowanych projektów, a tym samym ich konkurencyjność. Zarówno dla instytucji naukowych, jak i komercyjnych najważniejsze jest, aby do prowadzonych badań stosować materiał jak najlepszej jakości, przy jak najniższym koszcie. Z tego też powodu, chociaż autorzy mają świadomość występowania skał mogących służyć do produkcji symulantów skał księżycowych w innych rejonach Europy czy też innych kontynentów, nie rozważają tego zagadnienia w ramach niniejszego artykułu. Po pierwsze, sprowadzanie takiego surowca z innych rejonów Europy czy też świata jest kosztowne i nie wyeliminowałoby problemu z dostępnością do tego rodzaju materiału, ponieważ koszt ostatecznego produktu byłby wciąż wysoki. W związku z tym nie bierzemy pod uwagę wykorzystania skał pochodzących z rejonów, z których nie będziemy w stanie ich w sposób opłacalny dla produktu ostatecznego sprowadzić. Po drugie, analiza takich skał znacznie wydłużyłaby tekst manuskryptu, nie dając czytelnikowi odpowiedzi na pytanie, czy skały dolnośląskie są potencjalnie dobrym materiałem do produkcji symulantu księżycowego. Warto jednak zaznaczyć w tym miejscu, że badania nad stworzeniem symulantu regolitu księżycowego, również ze skał występujących lokalnie, prowadzone były i są w dalszym ciągu w różnych rejonach świata (Kanamori i in., 1998; Zheng i in., 2009; Spray, 2010; Engelschion i in., 2020; Li i in., 2022; Toklu i in., 2023).

WNIOSKI

Duże różnice w składzie chemicznym pomiędzy skałami budującymi pierwotną planetarną skorupę Księżyca a magmowymi skałami zasadowymi Dolnego Śląska reprezentującymi silnie zdyferencjonowane skały magmowe skorupy ziemskiej i górnego płaszczka nie są zaskakujące. Niemniej jednak w przypadku bazaltoidów w najbliższym czasie będzie zapewne możliwe znalezienie skał, które będzie można z pewnym przybliżeniem uznać za ana-

logi bazaltoidów księżycowych. W przypadku skał plutonicznych, zwłaszcza anortozytów, znalezienie dolnośląskich analogów skał księżycowych będzie możliwe tylko z dużym przybliżeniem.

Na postawione w tytule pytanie należy obecnie odpowiedzieć przecząco. Nie jesteśmy w stanie wskazać analogów skał magmowych Księżyca. Niemniej jednak możemy określić lokalizacje, z których bazaltoidy mogą zostać uznane, z niewielkim przybliżeniem, za analogi bazaltów księżycowych. Bazaltoidy najbardziej podobne w składzie chemicznym do księżycowych stwierdzono w okolicach Lubania, w kamieniołomach *Ksieginki* i *Zareba*. Skałami tymi są bazalty i foidyty. Natomiast analogów skał plutonicznych, nawet z dużym przybliżeniem, obecnie nie można wskazać. Potrzebne są dalsze badania w masywach ofiolitowych wokół kry sowiogórskiej. Istotne będzie także przeprowadzenie dalszych badań kenozoicznych bazaltoidów, w tym ich wystąpień na Śląsku Opolskim.

Niewątpliwie w oparciu o dolnośląskie skały bazaltoidowe, a w późniejszym czasie być może także wykorzystując skały gabroidowe, możliwe będzie produkowanie na Dolnym Śląsku naturalnego analogu regolitu księżycowego. Powinno to zapewnić firmom badawczym i komercyjnym sektora kosmicznego w Polsce dostęp do dobrej jakości relatywnie taniego analogu regolitu księżycowego.

Warto kontynuować podjęte przez autorów prace, szczególnie mające na celu charakterystykę składu chemicznego minerałów skał księżycowych i ich potencjalnych ziemskich odpowiedników. Rozsądnym kierunkiem dalszych badań jest także charakterystyka strukturalno-teksturalna skał księżycowych i ziemskich kandydatów do pełnienia roli ich analogów.

Autorzy dziękują za wykonanie rysunku przekroju Księżyca (ryc. 2) oraz przekroju przez regolit Księżyca (ryc. 4) Jolancie Przylibskiej. Składamy również podziękowania recenzentom: dr Monice Nowak i dr. Jakubowi Ciążeli, którzy przebrnęli przez długą pierwotną wersję manuskryptu. Wykonanie rzetelnych i bardzo drobiazgowych recenzji pozwoliło autorom na uzupełnienie wielu bardzo przydatnych informacji zarówno w tekście artykułu, jak i we własnej wiedzy.

LITERATURA

ANAND M., CRAWFORD I.A., BALAT-PICHELIN M., ABANADES S., van WESTRENN W., PÉRAUDEAU G., JAUMANN R., SEBOLDT W. 2012 – A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial in situ resource utilization (ISRU) applications. *Planet. Space Sci.*, 74: 42–48; <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2012.08.012>

ASHWAHL L.D. 2013 – Anorthosites. Springer, Berlin Heidelberg.

BARR A.C. 2016 – On the origin of Earth's Moon. *J. Geophys. Res.: Planets*, 121: 1573–1601; <https://doi.org/10.1002/2016JE005098>

BELL S., JOY K., MOORE K. 2022 – 50 years of Luna legacy. *Astronom. Geophys.*, 63 (1): 14–20; <https://doi.org/10.1093/astrogeo/atac008>

BENNETT N.J., ELLENDER D., DEMPSTER A.G. 2020 – Commercial viability of lunar In-Situ Resource Utilization (ISRU). *Planet. Space Sci.*, 182; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104842>

BIRKENMAJER K., PÉCSKAY Z., GRABOWSKI J., LORENC M., ZAGOŹDŻON P.P. 2002a – Radiometric dating of the Tertiary volcanics in Lower Silesia, Poland. II. K-Ar and palaeomagnetic data from Neogene basanites near Łądek Zdrój, Sudetes Mts. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 72 (2): 119–129.

BIRKENMAJER K., PÉCSKAY Z., GRABOWSKI J., LORENC M., ZAGOŹDŻON P.P. 2002b – Radiometric dating of the Tertiary volcanics in Lower Silesia, Poland. III. K-Ar and palaeomagnetic data from Early Miocene basaltic volcanics near Jawor, Fore-Sudetic Block. *Ann. Soc. Geol. Poloniae*, 72 (3): 241–253.

BIRKENMAJER K., PÉCSKAY Z., GRABOWSKI J., LORENC M., ZAGOŹDŻON P.P. 2004 – Radiometric dating of the Tertiary volcanics in Lower Silesia, Poland. IV. Further K-Ar and palaeomagnetic data from

Late Oligocene to Early Miocene basaltic rocks of the Fore-Sudetic Block. *Sudetes Mts. Ann. Soc. Geol. Pol.*, 74 (1): 1–19.

BIRKENMAJER K., PÉCSKAY Z., GRABOWSKI J., LORENC M., ZAGOŹDŻON P.P. 2007 – Radiometric dating of the Tertiary volcanics in Lower Silesia, Poland. V. K-Ar and palaeomagnetic data from Late Oligocene to Early Miocene basaltic volcanics of the North-Sudetic Depression. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 77 (1): 1–16.

BIRKENMAJER K., PÉCSKAY Z., GRABOWSKI J., LORENC M.W., ZAGOŹDŻON P.P. 2011 – Radiometric dating of the tertiary volcanics in Lower Silesia, Poland. VI. K-Ar and palaeomagnetic data from basaltic rocks of the west Sudety Mountains and their northern foreland. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 81: 115–131.

BOLEWSKI A., MANECKI A. 1990 – Minerale i ich geneza. *Utwory pozaziemskie (kosmomineralogia – minerały i skały Kosmosu)*. [W:] Bolewski A., Kubisz J., Manecki A., Żabiński W., *Mineralogia ogólna*. Wydaw. Geol., Warszawa: 446–454.

BONIN B. 2012 – Extra-terrestrial igneous granites and related rocks: A review of their occurrence and petrogenesis. *Lithos*, 153: 3–24.

BORKOWSKA M. 1985 – Skały gabrowe Masywu Nowej Rudy w Sudetach i ich minerały. *Geol. Sudet.*, 20 (1): 3–35.

CALZADA-DIAZ A., JOY K.H., CRAWFORD I.A., NORDHEIM T.A. 2015 – Constraining the source regions of lunar meteorites using orbital geochemical data. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50 (2): 214–228; doi: 10.1111/maps.12412

CASANOVA S., ESPEJEL C., DEMPSTER A.G., ANDERSON R.C., CAPRARELLI G., SAYDAM S. 2020 – Lunar polar water resource exploration – Examination of the lunar cold trap reservoir system model and introduction of play-based exploration (PBE) techniques. *Planet. Space Sci.*, 180; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104742>

CIAZELA J., BAKALA J., KOWALINSKI M., PIETEREK B., STESLICKI M., CIAZELA M., PASLAWSKI G., ZALEWSKA N., STERCZEWSKI L., SZAFORZ Z., JOZEFOWICZ M., MARCINIAK D., FITT M., SNIADKOWSKI A., RATAJ M., MROZEK T. 2023 – Lunar ore geology and feasibility of ore mineral detection using a far-IR spectrometer. *Front. Earth Sci.*, 11:1190825; doi: 10.3389/feart.2023.1190825

DOMINGUEZ J.A., WHITLOW J. 2019 – Upwards migration phenomenon on molten lunar regolith: New challenges and prospects for ISRU. *Advan. Space Res.*, 63: 2220–2228; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.014>

ENGELSCHION V.S., ERIKSSON S.R., COWLEY A., FATERI M., MEURISSE A., KUEPPERS U., SPERL M. 2020 – EAC-1A: A novel large-volume lunar regolith simulant. *Sci. Rep.*, 10: 5473; <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62312-4>

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, 829–851.

FA W., JIN Y.-Q. 2007 – Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer. *Icarus*, 190: 15–23.

FA W., JIN Y.-Q. 2010 – Global inventory of Helium-3 in lunar regoliths estimated by a multi-channel microwave radiometer on the Chang-E 1 lunar satellite. *Chinese Sci. Bull.*, 55 (35): 4005–4009.

FLOYD P.A., KRYZA R., CROWLEY Q.G., WINCHESTER J.A., ABDEL WAHED M. 2002 – Ślęza ophiolite: geochemical features and relationship to Lower Palaeozoic rift magmatism in the Bohemian Massif. [W:] Winchester J.A., Pharaoh T.C., Verniers J. (red.) *Palaeozoic Amalgamation of Central Europe*. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 201: 197–215.

FORTEZZO C.M., SPUDIS P.D., HARREL S.L. 2020 – Release of the Digital Unified Global Geologic Map of the Moon At 1:5,000,000- Scale. Paper presented at the 51st Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, TX. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/2760.pdf>

GLADMAN B.J., BURNS J.A., DUNCAN M.J., LEVISON H.F. 1995 – The dynamical evolution of lunar impact ejecta. *Icarus*, 118: 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: 1387–1392.

GREELEY R., BATSON R. 1999 – *Atlas Układu Słonecznego NASA*. Prószyński i S-ka, Warszawa.

GROSSMAN K.D., SAKTHIVEL T.S., SIBILLE L., MANTOVANI J.G., SEAL S. 2019 – Regolith-derived ferrosilicon as a potential feedstock material for wire-based additive manufacturing. *Advan. Space Res.*, 63: 2212–2219; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.002>

GUNIA P. 1992 – Petrologia skał ultrazasadowych z Masywu Braszowic-Brzeźnicy (Blok Przdedsudecki). *Geol. Sudet.*, 26 (1): 119–170.

HADLER K., MARTIN D.J.P., CARPENTER J., CILLIERS J.J., MORSE A., STARR S., RASERA J.N., SEWERYN K., REISS P., MEURISSE A. 2020 – A universal framework for Space Resource Utilisation (SRU). *Planet. Space Sci.*, 182; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104811>

- HAYNE P.O., HENDRIX A., SEFTON-NASH E., SIEGLER M.A., LUCEY P.G., RETHERFORD K.D., WILLIAMS J.-P., GREENHAGEN B.T., PAIGE D.A. 2015 – Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements. *Icarus*, 255: 58–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2015.03.032>
- HAYNE P.O., AHARONSON O., SCHÖRGHOFER N. 2021 – Micro cold traps on the Moon. *Nature Astronom.*, 5: 169–175; <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1198-9>
- HE H., JI J., ZHANG Y., HU S., LIN Y., HUI H., HAO J., LI R., YANG W., TIAN H., ZHANG Ch., ANAND M., TARTČSE R., GU L., LI J., ZHANG D., MAO Q., JIA L., LI X., CHEN Y., ZHANG L., NI H., WU S., WANG H., LI Q., HE H., XIANHUA Li X., WU F. 2023 – A solar wind-derived water reservoir on the Moon hosted by impact glass beads. *Nature Geosci.*, <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01159-6>
- HIESINGER H., HEAD J.W. 2006 – New View of Lunar Geoscience: An Introduction and Overview. *Rev. Mineral. Geochem.*, 60: 1–81; <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.60.1>
- HONNIBALL C.I., LUCEY P.G., LI S., SHENOY S., ORLANDO T.M., HIBBITTS C.A., HURLEY D.M., FARELL W.M. 2021 – Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA. *Nat. Astronom. Lett.*, <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01222-x>
<https://www.nasa.gov/specials/artemis/#top>; dostę: 3.02.2023 r.
<https://exolithsimulants.com/collections/lunar-simulants>; dostę: 3.12.2023 r.
- HU S., HE H., JI J., LIN Y., HUI H., ANAND M., TARTESE 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: 49–53; <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04107-9>
- JAMROZIK L. 1989 – Strefa mineralizacji ilmenitowej Strzegomiany-Kunów w intruzji gabrowej Ślęży w obrębie ofiolitu Sobótki (Dolny Śląsk). *Prz. Geol.*, 37 (10): 477–484.
- 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., WIECZOREK M., SPOHN T., ROBINSON M.S., OBERST J. 2012 – Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding. *Planet. Space Sci.*, 74: 15–41; <http://dx.doi.org/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. *Sci. Bull.*, <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.05.021>
- JIN Y.-Q., FA W., WIECZOREK M.A. 2010 – Preliminary analysis of microwave brightness temperature of the lunar surface from Chang-E 1 multi-channel radiometer observation and inversion of regolith layer thickness. 41st Lunar and Planetary Science Conference, 1331.
- JOHNSON J.R., SWINDLE T.D., LUCEY P.G. 1999 – Estimated Solar Wind-Implanted Helium-3 Distribution on the Moon. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (3): 385–388.
- JUST G.H., SMITH K., JOY K.H., ROY M.J. 2020 – Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar In Situ Resource Utilization (ISRU) and recommendations for future excavation experiments. *Planet. Space Sci.*, 180; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104746>
- KALLIO E., DYADECHKIN S., WURZ P., KHODACHENKO M. 2019 – Space weathering on the Moon: Farside-nearside solar wind precipitation asymmetry. *Planet. Space Sci.*, 166: 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.07.013>
- KANAMORI H., UDAGAWA S., YOSHIDA T., MATSUMOTO S., TAKAGI K. 1998 – Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan. *Space*, 98: 462–468; [https://doi.org/10.1061/40339\(206\)53](https://doi.org/10.1061/40339(206)53)
- KIM K.J., WÖHLER Ch., BEREZHNOY A.A., BHATT M., GRUMPE A. 2019 – Prospective 3He-rich landing sites on the Moon. *Planet. Space Sci.*, 177, 104686; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.07.001>
- KOBLITZ J. 2010, MetBase® ver. 7.3. Meteorite Data Retrieval Software. Ritterhude, Germany.
- KOZŁOWSKI S. 1975 – Surowce skalne Polski. Wydaw. Geol., Warszawa.
- 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. 2022a – Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *Nat. Sci. Rev.*, 9 (2), nwab188; <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab188>
- LI Ch., WEI K., LI Y., MA W., LEI Y., YU H., LIU J. 2022b – A novel strategy to extract lunar mare KREEP-rich metal resources using a silicon collector. *J. Rare Earths*, <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.07.002>
- LI R., ZHOU G., YAN K., CHEN J., CHEN D., CAI S., MO P.Q. 2022 – Preparation and characterization of a specialized lunar regolith simulant for use in lunar low gravity simulation. *Internat. J. Min. Sci. Technolog.*, 32 (1): 1–15; <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.003>
- LIM S., ANAND M. 2019 – Numerical modelling of the microwave heating behaviour of lunar regolith. *Planet. Space Sci.*, 179; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104723>
- LIU J., LIU B., REN X., LI Ch., SHU R., GUO L., ZHANG H., LIU D., ZENG X., GAO X., ZHANG G., YAN W., YU H., JIA L., JIN S., XU Ch., DENG X., XIE J., YANG J., HUANG Ch., ZUO W., SU Y., WEN W., OUYANG Z., 2022 – Evidence of water on the lunar surface from Chang'E-5 in-situ spectra and returned samples. *Nat. Communicat.*, 13: 3119; <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30807-5>
- 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. *J. Geophys. Res.: Planets*, 123: 910–951; <https://doi.org/10.1002/2017JE005333>
- LOMAX B.A., CONTI M., KHAN N., BENNETT N.S., GANIN A.Y., SYMES M.D. 2020 – Proving the viability of an electrochemical process for the simultaneous extraction of oxygen and production of metal alloys from lunar regolith. *Planet. Space Sci.*, 180; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104748>
- ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A. 2019 – Potential deposits of selected metallic resources on L chondrite parent bodies. *Planet. Space Sci.*, 168: 40–51; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.02.005>
- ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A. 2021 – Selected metal resources on H chondrite parent bodies. *Planet. Space Sci.*, 206, 105309. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105309>
- MANECKI A. 1988 – Meteoryty, tektyty i pyły kosmiczne oraz skały księżycowe. [W:] BOLEWSKI A., PARACHONIAK W. (red.), Petrografia. Wydaw. Geol., Warszawa: 610-619.
- MANECKI A. 2004 – Encyklopedia minerałów z polskim i angielskim słownikiem nazw. *Minerały Ziemi i materii kosmicznej*. Ucel. Wydaw. Nauk.-Dydakt., Kraków.
- MAYER C. 2012 – Lunar Sample Compendium. *Astromaterial. Res. Explor. Sci. (ARES)*, NASA; <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/index.cfm>; dostę: 2.02.2023 r.
- MAYERS J.S. 1988 – Oldest known terrestrial anorthosite at Mount Narryer, Western Australia. *Precamb. Res.*, 38 (4): 309–323; [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90030-7)
- MELOSH H.J. 2011 – Planetary surface processes. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MetBull, 2023 – The Meteoritical Bulletin Database, The Meteoritical Society; <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>; dostę: 3.02.2023 r.
- MISIAK J. 2022 – Geological exploration of the Moon. *Gosp. Sur. Mineral.*, 38 (4): 91–104; doi: 10.24425/gsm.2022.144095
- NASA, 1988 – Lunar Helium-3 and Fusion Power. Proceedings of a workshop sponsored by the NASA Office of Exploration and the Department of Energy Office of Fusion Energy and held at the NASA Lewis Research Center Cleveland, Ohio April 25 and 26. National Aeronautics and Space Administration Scientific and Technical Information Branch.
- ORLOFF R.W. 2004 – Apollo by the Numbers: A Statistical Reference. NASA History Division, Office of Policy and Plans, NASA Headquarters. Washington, DC.
- PAPIKE J.J., SIMON S.B., LAUL J.C. 1982 – The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology. *Rev. Geophys.*, 20 (4): 761; doi: 10.1029/rg020i004p0761
- PAPIKE J., TAYLOR L., SIMON S. 1991 – Lunar minerals. [W:] Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. (red.), *Lunar Sourcebook*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 121–181.
- PENDIAS H., MACIEJEWSKI S. 1959 – Zbiór analiz chemicznych skał magmowych i metamorficznych Dolnego Śląska. Wydaw. Geol., Warszawa.
- PIN C., MAJEROWICZ A., WOJCIECHOWSKA I. 1988 – Upper Paleozoic oceanic crust in the Polish Sudetes: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Lithos*, 21: 195–209.
- PITCHER C., KÖMLE N., LEIBNIZ O., MORALES-CALDERON O., GAO Y., RICHTER L. 2016 – Investigation of the properties of icy lunar polar regolith simulants. *Advances in Space Res.*, 57: 1197–1208; <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.030>
- PRZYLIBSKI T.A., BLUTSTEIN K., ŁUSZCZEK K., GRUCHOT J. 2022a – Chondryt węglisty NWA 4446. *Prz. Geol.*, 70 (7): 513–526, 494. doi: <http://dx.doi.org/10.7306/2022.17>
- PRZYLIBSKI T.A., BLUTSTEIN K., SZCZĘŚNIEWICZ M., ŁUSZCZEK K. 2023 – Pierwsza tona Księżyca na Ziemi. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 14: 163–182.
- PRZYLIBSKI T.A., ŁUSZCZEK K., BLUTSTEIN K., SZCZĘŚNIEWICZ M., CIAPKA D. 2022b – Górnictwo pozaziemskie w Polsce. *Prz. Górn.*, 3: 17–24.
- RASERA J.N., CILLIERS J.J., LAMAMY J.A., HADLER K. 2020 – The beneficiation of lunar regolith for space resource utilisation: A review. *Planet. Space Sci.*, 186; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104879>
- REISS P., KERSCHER F., GRILL L. 2020 – Thermogravimetric analysis of chemical reduction processes to produce oxygen from lunar regolith. *Planet. Space Sci.*, 181; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104795>

- RUBIN A.E. 1997 – Mineralogy of meteorite groups. *Meteorit. Planet. Sci.*, 32: 231–247; <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01262.x>
- RUBIN A.E., MA C. 2017 – Meteoritic minerals and their origins. *Chemie der Erde*, 77: 325–385; <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2017.01.005>
- RYKA J., RYKA W. 1966 – Katalog analiz chemicznych skał i minerałów Polski. Część III, 1958–1962. Pr. Inst. Geol., Tom III. Wydaw. Geol., Warszawa.
- SARGEANT H.M., BARBER S.J., ANAND M., ABERNETHY F.A.J., SHERIDAN S., WRIGHT I.P., MORSE A.D. 2021 – Hydrogen reduction of lunar samples in a static system for a water production demonstration on the Moon. *Planet. Space Sci.*, 205; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105287>
- SCHLÜTER L., COWLEY A. 2020 – Review of techniques for In-Situ oxygen extraction on the moon. *Planet. Space Sci.*, 181; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104753>
- SCHWANDT C., HAMILTON J.A., FRAY D.J., CRAWFORD I.A., 2012 – The production of oxygen and metal from lunar regolith. *Planet. Space Sci.*, 74: 49–56; <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2012.06.011>
- SONG H., ZHANG J., SUN Y., LI Y., ZHANG X., MAD., KOU J. 2021 – Theoretical Study on Thermal Release of Helium-3 in Lunar Ilmenite. *Minerals*, 11, 319; <https://doi.org/10.3390/min11030319>
- SPRAY J.G. 2010 – Generation of a lunar regolith agglutinate simulant using friction welding apparatus. *Planet. Space Sci.*, 58: 1771–1774; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.09.002>
- 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 Planet. Sci.*, 48, 1591.pdf.
- TAYLOR S.R., MCLENNAN S.M. 2010 – Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge University Press, UK.
- TIKOO S.M., WEISS B.P., SHUSTER D.L., SUAVET C., WANG H., GROVE T.L. 2017 – A two-billion-year history for the lunar dynamo. *Sci. Advances*, 3: e1700207
- TOKLU Y.C., AÇIKBAŞ N.Ç., AÇIKBAŞ G., ÇERÇEVİK A.E., AKPINAR P. 2023 – Production of a set of lunar regolith simulants based on Apollo and Chinese samples. *Advan. Space Res.*, 72 (2): 565–576; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.03.035>
- WARREN P.H. 1994 – Lunar and Martian meteorite delivery services. *Icarus*, 111: 338–363.
- WASILEWSKI T.G. 2021 – Lunar thermal mining: Phase change interface movement, production decline and implications for systems engineering. *Planet. Space Sci.*, 199, 105199; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105199>
- WASILEWSKI T.G., BARCIŃSKI T., MARCHEWKA M. 2021 – Experimental investigations of thermal properties of icy lunar regolith and their influence on phase change interface movement. *Planet. Space Sci.*, 200, 105197; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105197>
- WIDDOWSON M. 2011 – Planetary volcanism – ultima thule? [W:] ROTHERY D.A., MCBRIDE N., GILMOUR I. (red.), *An introduction to the Solar System*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 3: 83–126.
- WIECZOREK M., JOLLIFF B., KHAN A., PRITCHARD M.E., WEISS B.P., WILLIAMS L.L., HOOD L.L., RIGHTER K., NEAL C., SHEARER C.K., McCALLUM I.S., TOMPKINS S., HAWKE B.R., PETERSON C.A., GILLIS J.J., BUSSEY D.B.J. 2006. – The constitution and structure of the lunar interior. *Rev. Mineral. Geochem.*, 60: 221–364.
- WIŚNIEWSKI Ł., WASILEWSKI G., KĘDZIORA B., GRYGORCZUK J. 2022 – Wybrane właściwości regolitu i ich istotny wpływ na realizację misji eksploracyjnych. *Acta Soc. Meteorit. Pol.*, 13: 107–119.
- WOJTULEK P.M., SCHULZ B., KLEMD R., GIL G., DAJEK M., DELURA K. 2022 – The Central-Sudetic ophiolites – Remnants of the SSZ-type Devonian oceanic lithosphere in the European part of the Variscan Orogen. *Gondwana Res.*, 105: 343–365; <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.09.015>
- YAMASHITA N., HASEBE N., REEDY R.C., KOBOYASHI S., KAROUJI Y., HAREYAMA M., SHIBAMURA E., KOBAYASHI M.-N., OKUDAIRA O., d'USTON C., GASNAULT O., FORNI O., KIM K.J. 2010 – Uranium on the Moon: Global distribution and U/Th ratio. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L10201; <https://doi.org/10.1029/2010GL043061>
- ZHENG Y., WANG S., ZIYUAN O., YONGLIAO Z., JIANZHONG L., CHUNLAI L., XIONGYAO L., JUNMING F. 2009 – CAS-1 lunar soil simulant. *Advan. Space Res.*, 43: 448–454; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.07.006>
- ZHOU Ch., TANG H., LI X., ZENG X., MO B., YU W., WU Y., ZENG X., LIU J., WEN Y. 2022 – Chang'E-5 samples reveal high water content in lunar minerals. *Nat. Communicat.*, 13: 5336; <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33095-1>
- ZWIERZYŃSKI A.J., TEPER W., WIŚNIEWSKI R., GONET A., BURATOWSKI T., UHL T., SEWERYN K. 2021 – Feasibility study of low mass and low energy consumption drilling devices for future space (mining surveying) missions. *Energies*, 14, 5005; <https://doi.org/10.3390/en14165005>

Praca wpłynęła do redakcji 12.05.2023 r.
Akceptowano do druku 17.01.2024 r.