

Marcin KACZMARZYK¹

Zjawiska impaktowe jako nadrzędny proces kształtujący powierzchnię Księżyca

Impact phenomena as a major process shaping the Moon's surface

Abstract: This article reviews selected issues related to the effects that impact phenomena exert on the lunar landscape and on the properties of the regolith covering its surface. The basic differences between terrestrial and lunar environment are presented in this paper. These differences are key to understanding the role that impacts of small bodies play in shaping the Moon's surface. Cosmic matter reaches the surface of the atmosphereless Moon without any obstacles, colliding with it at speeds expressed in kilometers per second. The vast majority of this matter is micrometeoroids and space dust, whose impacts have only local effects. The power-law nature of the distribution of the abundance of small bodies in the Solar System as a function of their mass makes the frequency of impacts on the Moon's surface by objects with masses of more than a kilogram very low. At the current stage of the evolution of the Solar System, the lack of endogenic processes in the lunar lithosphere makes impact phenomena and space weathering practically the only processes shaping the lunar surface.

Keywords: impact phenomena, the Moon, lunar regolith, space weathering

Wstęp

Księżyc jest ciałem niebieskim pozbawionym gazowej atmosfery. Do powierzchni Księżyca bez jakichkolwiek przeszkód dociera zatem strumień małych ciał niebieskich o bardzo zróżnicowanych masach i rozmiarach; od mikroskopijnych cząstek pyłu kosmicznego, aż po wielokilometrowej wielkości komety i planetoidy. Księżyc jest ciałem niebieskim nie wykazującym aktywności geologicznej, jednocześnie na jego powierzchni nie zachodzą powszechne w ziemskim środowisku zjawiska erozji. Z tego powodu uderzenia małych ciał niebieskich w Księżyc uznaje się za dominujący czynnik kształtujący jego powierzchnię. Celem niniejszego artykułu jest dokonanie przeglądu obecnego stanu wiedzy w zakresie wpływu zjawisk impaktowych na krajobraz Księżyca oraz na własności regolitu pokrywającego jego powierzchnię.

¹ *Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów; e-mail: kaczmar@prz.edu.pl*

Księżycowy krajobraz

W porównaniu z wielką różnorodnością ziemskich form terenu i struktur geologicznych, krajobraz srebrnego globu jest stosunkowo słabo zróżnicowany. Na Księżycu wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje rzeźby terenu – morza i wyżyny.

Morza księżycowe to rozległe równiny pokryte bazaltami, uformowane przed miliardami lat wskutek aktywności wulkanicznej (Vaniman i in. 1991). Dla obserwatora na Ziemi, księżycowe morza są łatwo dostrzegalne nawet nieuzbrojonym okiem, w postaci ciemnych obszarów na tarczy Księżycy. Nazwa tych obszarów pochodzi od łacińskiego słowa *Maria* (morza) i wynika z przekonania siedemnastowiecznych astronomów, że obszary te to zbiorniki wodne. Stosunkowo wysoka zawartość żelaza w bazaltach sprawia, że wartość albedo mórz księżycowych wynosi zaledwie 0,07 do 0,10 (Vaniman i in. 1991). Morza pokrywają około 16% całkowitej powierzchni Srebrnego Globu, lecz znaczna większość z nich znajduje się na widocznej (z Ziemi) stronie Księżycy, stanowiąc aż 32% jej powierzchni. Niewidoczna z Ziemi strona Księżycy nie posiada dużych mórz, a kilka niewielkich równin bazaltowych pokrywa zaledwie 1% jej obszaru (Gillis i Spudis 1996).

Morza to stosunkowo młode obszary Księżycy, a wiek większości z nich datuje się na 3–3,5 mld lat (Hiesinger i in. 2003). Największe morza księżycowe są przyczyną istnienia dziesięciu najsilniejszych anomalii pola grawitacyjnego Księżycy (NASA 2006). Anomalie te wywołane są istnieniem tzw. maskonów (ang. *Mascon* – *mass concentrations*), czyli lokalnych skupisk masy w księżycowej skorupie lub górnym płaszczu, o gęstości zauważalnie większej od średniej gęstości Księżycy.

Eksperymenty przeprowadzone w latach 60 i 70 XX w. dowiodły, że obecność maskonów wywołuje silne perturbacje w ruchu sztucznych satelitów na niskich orbitach Księżycy, doprowadzając do ich przedwczesnej deorbitacji (Muller i in. 1968). Znane są tylko cztery stabilne niskie orbity okołoksiężycowe, dobrane tak, że ich trajektorie omijają strefy silnych wpływów maskonów (NASA 2006).

Księżycowe wyżyny, stanowiące 84% powierzchni Srebrnego Globu to obszary znacznie starsze od mórz księżycowych. Zgodnie z powszechnie uznawaną hipotezą wielkiego zderzenia, uważa się, że anortozyty budujące wyżyny wykryły bezpośrednio z księżycowego oceanu magmy, około 4,4 mld lat temu i stanowią one pierwotną skorupę Księżycy (Vaniman i in. 1991). Szacuje się, że ponad 70% powierzchni Księżycy liczy ponad 4 mld lat. Ze względu na swój wiek, księżycowe wyżyny są znacznie silniej pokraterowane od mórz, ich powierzchnia jest pofalowana, pokryta wzgórzami i łańcuchami górskimi, o wysokościach względnych nierzadko dochodzących do kilku kilometrów (Hörz i in. 1991). Wartości albedo księżycowych wyżyn zawierają się w większości w przedziale 11–18%, toteż obszary te postrzegane są jako zauważalnie jaśniejsze od księżycowych mórz (Vaniman i in. 1991).

Procesy kształtujące powierzchnię Księżyca

Według obecnego stanu wiedzy, Księżyc jest już ciałem geologicznie nieaktywnym. Z uwagi na względnie małe rozmiary Srebrnego Globu, jego wnętrze stosunkowo szybko ostygło i w znacznej mierze skryształizowało (Hörz i in. 1991; Mighani i in. 2020). Powierzchniowe pomiary gęstości strumienia ciepła geotermalnego przeprowadzone w miejscach lądowań Apollo 15 i Apollo 17 pozwoliły uzyskać wyniki odpowiednio 0,033 i 0,021 W/m² (Langseth i Keihm 1974), co stanowi mniej niż połowę tej średniej wartości na powierzchni Ziemi (Stanley 2002). Z tego powodu na Księżycu nie zachodzą już procesy wulkaniczne, ani tektoniczne (Hörz i in. 1991). Bardzo słabe, lecz cyklicznie rejestrowane na powierzchni Księżyca fale sejsmiczne, uznaje się w większości za przejawy oddziaływań pływowych, choć niektóre wstrząsy z pewnością mają swoje źródła w zjawiskach impaktowych oraz w sporadycznej aktywności osuwiskowej (Lammlein 1977, Nakamura i in. 1982). Brak atmosfery, hydrosfery i biosfery sprawia, że na Księżycu nie zachodzą powszechne na Ziemi procesy erozji (Bandfield 2011). Różnice w dynamice procesów kształtujących powierzchnie Ziemi i Księżyca dobrze obrazuje wiek powierzchni obu tych obiektów planetarnych. Szacuje się, że na Ziemi wiek około 80% powierzchni lądów i den oceanicznych nie przekracza 200 milionów lat, podczas gdy ponad 99% powierzchni Srebrnego Globu uformowała się przed trzema miliardami lat, a wiek około 70% jego powierzchni liczy około cztery miliardy lat (Hörz i in. 1991). Innym świadectwem niskiej złożoności zjawisk zachodzących w księżycowym środowisku jest skład mineralny Srebrnego Globu. Ze względu na niewystępowanie na Księżycu wielu procesów geologicznych zachodzących na Ziemi, skład mineralny Księżyca jest znacznie mniej zróżnicowane od ziemskiego. W dostępnych próbkach skał księżycowych zidentyfikowano jak dotąd poniżej stu minerałów (Carrier i in. 1991; Papike i in. 1991), co należy uznać za ilość bardzo ograniczoną w porównaniu z ponad czterema tysiącami opisanych minerałów ziemskich (National Geographic). Przy braku procesów endogenicznych, jedynymi procesami egzogenicznymi kształtującymi obecnie powierzchnię Księżyca są zjawiska impaktowe oraz wietrzenie kosmiczne.

Małe ciała Układu Słonecznego i zjawiska impaktowe

Oprócz Słońca, planet, planet karłowatych i ich księżyców, istotną klasę obiektów w naszym systemie planetarnym stanowią tzw. Małe Ciała Układu Słonecznego (dalej: małe ciała), do których zaliczają się komety, planetoidy, meteoroidy, mikro-meteoroidy i pył kosmiczny. Małe ciała stanowią znikomy ułamek procenta masy Układu Słonecznego, lecz jest to niezwykle licznie reprezentowana klasa obiektów. Na dzień 14 marca 2024 r. organizacja Minor Planet Center dysponowała danymi dotyczącymi ponad 1 340 000 komet, planetoid i meteoroidów, mierzących od 5 m do 525 km (Minor Planet Center). Obecne szacunki mówią, że w Układzie Słonecznym liczba planetoid większych niż 100 m przekracza 25 milionów (Bottke i in. 2005). Rozkład liczebności Małych Ciał Układu Słonecznego w funkcji ich

wielkości określony jest prawem potęgowym (O'Brien i Greenberg 2003; Durda i in. 1998), oznacza, że liczba obiektów o wielkościach <1 km jest wielokrotnie większa (Marcus 1965). Szacuje się, że liczba komet zgromadzonych na dalekich obrzeżach Układu Słonecznego w tzw. Obłoku Oorta jest rzędu 10^{12} (ScienceDirect A). Planety, ich księżyce i małe ciała nie stanowią oddzielnych, izolowanych układów, lecz są integralnymi częściami nieustannie ewoluującego, naszego systemu planetarnego. Orbity małych ciał podlegają nieustannym modyfikacjom podczas wzajemnych zbliżeń, jak również wskutek oddziaływań grawitacyjnych z planetami. Skutki pojedynczych perturbacji grawitacyjnych są zazwyczaj bardzo subtelne, lecz w geologicznej skali czasu doprowadzają do wzajemnych kolizji i zderzeń z obiektami planetarnymi (Hörz i in. 1991).

Dostępne analizy sugerują, że na powierzchnię Księżyca spada rocznie około 1800 ton materii międzyplanetarnej w postaci mikrometeoroidów i pyłu kosmicznego (Vanzani i in. 1997). Jak podają O'Brien i Greenberg (2003), rozkład wielkości małych ciał uderzających w powierzchnię naszego naturalnego satelity ma charakter wykładniczy, tzn. częstotliwość uderzeń rośnie tu wykładniczo wraz ze spadkiem wielkości pocisków. Ci sami autorzy podają, że powyższa zależność charakteryzuje również rozkład wielkości obiektów bliskich Ziemi (Near Earth Objects, NEO). Prawdziwość tego stwierdzenia potwierdzają m.in. wyniki badań przeprowadzonych przez Trilling i in. (2017.) Autorzy ci oszacowali, że wśród obiektów NEO znajduje się około 1000 planetoid o średnicy >1 km, około 3,5 mln planetoid większych od 10 m oraz około 7,9 mln obiektów, których rozmiar przekracza 7 m.

Statystykę uderzeń małych ciał w powierzchnię Księżyca przedstawiono ilościowo w tabeli 1. Przytoczone w niej dane stanowią przetworzoną syntezę informacji zawartych w (Vanzani i in. 1997; Suggs i in. 2014; Grieve 1983). Energię uderzenia obliczano jako energię kinetyczną pojedynczego ciała dla prędkości 15 km/s.

O ile dane statystyczne dotyczące stosunkowo częstych zdarzeń związanych z cząstkami submilimetrycznymi zostały wielokrotnie potwierdzone (Vanzani i in. 1997), to statystyki dla obiektów o masach w przedziale 10^{-2} – 10^1 kg pochodzą z zaledwie kilkuletnich obserwacji powierzchni Księżyca (Suggs i in. 2014) i ich

Tabela 1. Statystyka uderzeń małych ciał w powierzchnię Księżyca.
Table 1. Statistics of small celestial bodies impacting the Moon's surface.

Masa [kg]	Szacowany rozmiar	Częstotliwość uderzeń $1/\text{km}^2\text{-rok}$	Średni czas pomiędzy uderzeniami w 1 km^2	Energia uderzenia [J]
$1,0 \cdot 10^{-15}$	9 m	10^8	0,32 s	$1,13 \cdot 10^{-7}$
$1,0 \cdot 10^{-8}$	200 m	$5 \cdot 10^5$	26 min	$1,13 \cdot 10^0$
$1,0 \cdot 10^{-7}$	400 m	$4 \cdot 10^3$	35 h	$11,25 \cdot 10^0$
$3,0 \cdot 10^{-2}$	27 mm	$6,14 \cdot 10^{-4}$	61 000 lat	$3,38 \cdot 10^6$
$1,0 \cdot 10^1$	20 cm			$1,13 \cdot 10^9$
10 kg	20 cm	brak danych		

reprezentatywność jest ograniczona. Na dzień dzisiejszy nauka nie dysponuje miarodajnymi danymi dotyczącymi częstotliwości upadków na powierzchnię Księżyca meteoroidów o masach ponad 10 kg (Grieve 1983).

Bardzo charakterystycznym elementem księżycowego krajobrazu są wszechobecne krateru uderzeniowe (impaktowe). Te małe – o średnicach od kilku do kilkunastu metrów są widoczne na licznych zdjęciach z programu Apollo, podczas gdy największy z nich – Basen Biegun Południowy – Aitken ma średnicę ponad 2500 km i jest trzecim największym tego typu obiektem w Układzie Słonecznym. Krateru uderzeniowe powstają wskutek zjawisk impaktowych, czyli wysokoenergetycznych zderzeń małych ciał niebieskich z powierzchnią Księżyca.

Większość ciał niebieskich wchodzących w ziemską atmosferę gwałtownie wyhamowuje, sukcesywnie zmniejsza swoją masę wskutek ablacji, a często również podlega fragmentacji w formie spektakularnej eksplozji (Korpikiewicz 1988), jak to miało miejsce w przypadku bolidu Czelabińskiego w 2013 roku (Wikipedia B). Wszystkie te zjawiska sprawiają, że przed dotarciem do powierzchni naszej planety, znaczna część masy i energii kinetycznej większości pocisków ulega rozproszeniu, a w postaci makroskopowej do powierzchni Ziemi dociera od kilku do kilkunastu procent pierwotnej masy pocisku, i to tylko w przypadku dostatecznie masywnych obiektów o ograniczonej początkowej prędkości geocentrycznej (Korpikiewicz 1988). Takie makroskopowej wielkości fragmenty małych ciał Układu Słonecznego, które przetrwały przejście przez atmosferę i zderzenie z powierzchnią obiektu planetarnego, określa się jako meteoryty (Hurnik i Hurnik 2005; Korpikiewicz 1988). Fakt, że Księżyc nie posiada atmosfery sprawia, że wszystkie obiekty będące na kursie kolizyjnym docierają do jego powierzchni i uderzają w nią z typowymi prędkościami w zakresie 15–25 km/s, chociaż wartości te mogą wynosić nawet 73 km/s (Hörz i in. 1991; Korpikiewicz 1988). Podczas takich zderzeń dochodzi do gwałtownej przemiany energii kinetycznej pocisku, głównie na ciepło oraz pracę mechaniczną (Korpikiewicz 1988). W przypadku znacznej większości uderzeń małych ciał w powierzchnię Księżyca, energia uwalniana podczas uderzenia stanowi ułamek dziesiątej (tab. 1), a zjawisko nie wywiera makroskopowo obserwowalnego wpływu na powierzchnię Srebrnego Globu. Okresowo dochodzi jednak do uderzeń w powierzchnię Księżyca większych meteoroidów, planetoid i komet – mamy wówczas do czynienia z wyzwoleniem znacznych ilości energii, o wiele rzędów wielkości większych, niż ma to miejsce w przypadku uderzeń mikrometeoroidów i pyłu kosmicznego. Podobnie jak ma to miejsce w przypadku wybuchów jądrowych, energie takich uderzeń przedstawia się w postaci tzw. równoważnika trotylowego, czyli w przeliczeniu na energię detonacji odpowiedniej masy trinitrotoluenu (TNT):

$$1 \text{ t TNT} = 4,184 \cdot 10^9 \text{ J}$$

Energię wyzwalaną w wybranych zjawiskach impaktowych zestawiono w tabeli 2.

Podczas dużych zjawisk impaktowych dochodzi do wyparowania znacznej części lub nawet całości pocisku, jak również do wyrzutu materiału skalnego z obrębu formującego się krateru. W środowisku księżycowym, wyrzucony materiał, nie

Tabela 2. Porównanie wysokoenergetycznych zjawisk impaktowych.**Table 2.** Comparison of high-energy impact phenomena.

Obiekt	Średnica [m]	Prędkość [km/s]	Energia kinetyczna [J]	Równoważnik trotylowy [t TNT]
meteoroid kamienny, chondryt typu C	0,5	15	$2,13 \cdot 10^{10}$	5,1
meteoroid żelazny	0,5	15	$5,74 \cdot 10^{10}$	$1,37 \cdot 10^1$
mała planetoida typu C	100	15	$1,30 \cdot 10^{17}$	$3,10 \cdot 10^7$
mała planetoida typu M	100	15	$4,42 \cdot 10^{17}$	$1,06 \cdot 10^8$
mała kometa	500	15	$4,42 \cdot 10^{18}$	$1,06 \cdot 10^9$
przeciętna kometa	5000	15	$4,42 \cdot 10^{21}$	$1,06 \cdot 10^{12}$
duża planetoida typu C	10000	15	$8,24 \cdot 10^{22}$	$1,97 \cdot 10^{13}$
bolid Czelabiński (2013)	~17	~19	$1,8828 \cdot 10^{15}$	$4,5 \cdot 10^5$
katastrofa tunguska (1908)	?	?	$6,276 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^7$
bomba atomowa Little Boy (1945)	–	–	–	$1,5 \cdot 10^4$
Car-bomba (1961)	–	–	–	$5,8 \cdot 10^7$

spowalniany oporem atmosfery, może być rozrzucony na znacznych obszarach, formując charakterystyczne promienie i koncentryczne pierścienie wokół krateru pierwotnego. Duże bloki skalne uderzając z powrotem w powierzchnię z dużymi prędkościami mogą tworzyć tzw. krater wtórny (Hörz i in. 1991; Korpikiewicz 1988). Ze względu na brak erozji, krater uderzeniowy na Księżycu są znacznie bardziej trwałe i nieporównywalnie bardziej liczne niż na Ziemi. Do dnia 14 marca 2024 na naszej planecie zidentyfikowano i potwierdzono uderzeniowe pochodzenie 190 kraterów i innych struktur impaktowych (Earth Impact Database), podczas gdy katalog księżycowych kraterów zawiera ponad dwa miliony kraterów o średnicach przekraczających jeden kilometr (Robbins 2019), a liczba mniejszych kraterów jest bez wątpienia wielokrotnie większa. Zestawienie liczebności ziemskich i księżycowych kraterów w funkcji ich średnicy zawarto w tabeli 3.

Tabela 3. Potwierdzone krater uderzeniowy na Ziemi oraz zliczone krater uderzeniowy na Księżycu (Earth Impact Database, Robbins 2019).**Table 3.** Confirmed impact craters on Earth and counted craters on the Moon's surface (Earth Impact Database, Robbins 2019).

Średnica krateru [km]	Liczebność	
	Ziemia	Księżyc
<1	16	brak danych
1 do 5	41	1201947
5 do 10	38	66901
10 do 50	55	26211
50 do 100	8	1341
100 do 200	3	292
200 do 500	0	44
500 do 1000	0	16
1000 do 2000	0	2
2000	0	1

Powyższa statystyka dowodzi znacznej odmienności środowisk powierzchni Ziemi i Księżyca. Atmosfera naszej planety stanowi barierę dla stosunkowo niewielkich pocisków, a aktywność tektoniczna i różnorodne procesy wietrzenia stosunkowo szybko zacierają ślady uderzeń większych obiektów. Żaden z tych procesów nie występuje na powierzchni naszego naturalnego satelity, toteż jego powierzchnia wiernie zachowała zapis zjawisk, które miały miejsce nawet miliardy lat temu.

Zjawiska impaktowe a księżycowy regolit

Poza wpływem na krajobraz i globalne struktury Księżyca, wpływ zjawisk impaktowych dotyczy również własności samego regolitu pokrywającego powierzchnię Srebrnego Globu. Regolit to stosowane w geologii pojęcie ogólnie określające warstwę rozdrobnionego i nieskonsolidowanego materiału skalnego, który tworzy powierzchnię terenu przykrywając skałę macierzystą. Regolit może powstawać z materiału rodzimego lub zdeponowanego, toteż poszczególne tworzące go okruszki mogą mieć wysoce zróżnicowany charakter (Meyer 2003; McKay i in. 1991). Słowo regolit pochodzi z języka greckiego, powstało z połączenia słów rhexos (koc) oraz lithos (skała) (etymonline.com) i w przypadku ciał pozbawionych atmosfery odnosi się do warstwy materiału oddzielającego świeżą skałę macierzystą od przestrzeni kosmicznej. Niemal cała powierzchnia Księżyca pokryta jest regolitem – nieliczne wyjątki stanowią tu stromo nachylone zbocza kraterów i kanałów lawowych. Księżycowy regolit powstaje na drodze mechanicznej dezintegracji skał podczas zjawisk impaktowych i „dojrzewa” w procesie wietrzenia kosmicznego. Wyekspozowana, świeża skała macierzysta niszczona jest przez stosunkowo intensywne bombardowanie małymi meteoroidami, stąd początkowo grubość regolitu szybko przyrasta. Powiększająca się z czasem warstwa odłamków skalnych ogranicza dostęp małych pocisków do skały macierzystej. Wraz z upływem czasu, do przebicia tej warstwy zdolna jest jedynie wykładniczo zmniejszająca się populacja coraz to większych ciał, i tempo przyrostu grubości regolitu z czasem szybko spada (McKay i in. 1991).

Pomimo że na powierzchni Księżyca zalegają liczne głązy, umownie do regolitu zaliczana jest frakcja o rozmiarze ziaren < 1 cm. Tak zdefiniowany regolit nazywany jest także gruntem księżycowym (McKay i in. 1991; Alshibli). Grubość warstwy regolitu zależy od wieku powierzchni – wedle dzisiejszej wiedzy średnia grubość wynosi 4–5 m na obszarze mórz i od 10 do 15 m na księżycowych wyżynach (McKay i in. 1991). Wyniki orbitalnych badań radarowych sugerują, że pod opisanym wyżej regolitem pojawia się warstwa spękanych skał, na którą składają się bloki skalne o rozmiarach przekraczających jeden metr (Fa 2013). Warstwa ta, zwana megaregolitem, rozciąga się prawdopodobnie do głębokości kilku kilometrów i stanowi zewnętrzną część skorupy Księżyca, strzaskaną wskutek uderzeń dużych meteoroidów i planetoid (McKay i in. 1991).

Wietrzenie kosmiczne

Pod pojęciem wietrzenie kosmiczne rozumie się zespół procesów skutkujących zmianą właściwości fizycznych i optycznych materiału skalnego, wyeksponowanego na warunki otwartej przestrzeni kosmicznej. Takie warunki występują na powierzchni ciał niebieskich pozbawionych atmosfery i magnetosfery, m.in. na powierzchni Księżyca (ScienceDirect B). Nieustanna ekspozycja na stosunkowo częste uderzenia mikrometeoroidów i małych meteoroidów prowadzi do rozdrabniania, topienia, odparowywania i zlepiania materiału skalnego (Meyer 2003). Makroskopowe różnice pomiędzy przypowierzchniowym regolitem a głębiej położonymi warstwami księżycowego gruntu obejmują przede wszystkim zwiększony udział aglutynatów w przypowierzchniowym gruncie, wynoszący nawet 65% wszystkich ziaren. Spoiwem księżycowych aglutynatów jest szkliwo powstające głównie podczas stosunkowo częstych, niewielkich impaktów. Większe zjawiska impaktowe odpowiedzialne są za rozrzucanie i mieszanie gruntów zalegających na różnych głębokościach oraz za ekskawację świeżego materiału (Hörz i in. 1991; Vaniman i in. 1991; ScienceDirect B; McKay i in. 1991). Wysokoenergetyczne cząstki promieniowania kosmicznego i wiatru słonecznego są w stanie rozrywać pojedyncze cząsteczki minerałów oraz implantować obce atomy w gruncie księżycowym. Z tego względu, przypowierzchniowa warstwa księżycowego regolitu wykazuje podwyższoną zawartość metalicznego, nanofazowego żelaza, pochodzącego z rozbitych cząsteczek oliwinów i piroksenów. Odnotowano tu także wzbogacenie gruntu w cząsteczki gazów pochodzących ze Słońca, głównie w wodór i hel (Lucey i in. 2006; Meyer 2003).

Innym przejawem wietrzenia kosmicznego jest zmiana własności spektralnych księżycowego gruntu poddanego temu procesowi. Zmiany te sprowadzają się głównie do spadku całkowitego albedo (pociemnienie materiału) oraz do zwiększenia refleksyjności wraz z długością fali (lekkie poczerwienienie materiału) (Noble i in. 2007).

Księżycowe aglutynaty

W kontekście wpływu zjawisk impaktowych na genezę i ewolucję regolitu, na szczególną uwagę zasługują wspomniane już wcześniej, księżycowe aglutynaty. Aglutynaty to unikatowe twory petrologiczne, występowanie których jak dotąd stwierdzono jedynie na Księżycu. Aglutynaty mają postać drobnych (<1 mm), ostrokrawędzistych ziaren o mocno nieregularnych kształtach, mogących zawierać otwarte pory. Składają się one z jeszcze drobniejszych, częściowo stopionych różnorodnych ziaren sklejonych razem przez szkliwo impaktowe. Obrazy aglutynatów wykonane przy pomocy mikroskopii optycznej lub elektronowej zawsze ujawniają obecność czystego, nanofazowego żelaza (Wang i in. 2017; Taylor i in. 1991). Aglutynaty powstają wskutek bombardowania istniejącego już regolitu przez promieniowanie kosmiczne i strumień mikrometeoroidów. Promieniowanie kosmiczne (w tym jego składowa słoneczna) implantuje w regolicie obce cząstki, głównie pojedyncze protony, podczas gdy uderzenia mikrometeoroidów wyzwalają ciepło

niezbędne do stopienia drobnych ziaren regolitu i wytworzenia szkliwa. Płynne szkliwo skleja drobne, sąsiadujące ze sobą ziarna i przez krótki czas umożliwia zachodzenie reakcji chemicznych między wysoce reaktywnymi rodnikami wodorowymi, a FeO lub krzemianami (Lucey i in. 2006; McKay i in. 1991). W ten sposób dochodzi do redukcji żelaza, które obficie występuje w księżycowych minerałach.

Ze względu na sposób powstawania aglutynatów, ich zawartość jest uznawana za miarodajny wskaźnik wieku regolitu. Aglutynaty stanowią przeważnie 25–30% objętości księżycowego regolitu, aczkolwiek zanotowano wahania ich zawartości od zaledwie 5% do nawet 65% (McKay i in. 1991). Docierająca do powierzchni Księżyca materia kosmiczna w dostrzegalny sposób wpływa na skład księżycowego gruntu; w regolicie można odnaleźć także materiał obcy, nie pochodzący z Księżyca. Są to drobne fragmenty pochodzenia meteorytowego, stanowiące nawet do około 2% objętości regolitu (McKay i in. 1991).

Zjawiska impaktowe a wybrane własności regolitu

Wpływ zjawisk impaktowych obserwuje się również w kształcie ziaren księżycowego gruntu. Większość ziaren księżycowego regolitu jest lekko wydłużona i nie posiada zwartej formy, lecz są to cząstki nieregularne, o ostrych krawędziach, licznych wklęsłościach i otwartych porach. Z analiz przeprowadzonych przez Cadenhead i in. (1977) wynika, że całkowita powierzchnia ziaren w typowym gruncie księżycowym jest ośmiokrotnie większa niż w przypadku zbioru idealnie sferycznych ziaren o identycznym składzie granulometrycznym i takiej samej całkowitej masie.

Opisany wyżej kształt ziaren regolitu wynika z gwałtownego przebiegu zjawisk fizycznych towarzyszących uderzeniom małych ciał w powierzchnię Księżyca. Podczas takich zderzeń materiał skalny podlega kruszeniu, topieniu, rozrzucaniu, szybkiemu stygnięciu i wtórnemu kruszeniu. Powstałe w ten sposób kanciaste ziarna o złożonych, nieregularnych kształtach, nie są zaokrąglane przez erozję wodną, glacialną ani eoliczną, lecz pozostają nienaruszone przez miliony lat. Złożony kształt ziaren księżycowego regolitu sprawia, że powierzchnia styku sąsiadujących ze sobą ziaren jest bardzo ograniczona. Fakt ten należy do kluczowych czynników stanowiących o niezwykle niskiej przewodności cieplnej księżycowego regolitu (Vasavada i in. 2012). Innym przykładem wpływu zjawisk impaktowych na własności powierzchni Księżyca jest nadspodziewanie wysoka gęstość objętościowa regolitu, jak i jego zagęszczenie. Zanim doszło do pierwszych miękkich lądowań na powierzchni Księżyca, wielu naukowców i inżynierów pracujących dla NASA przy programie Apollo wyrażało obawy, że ważący kilkanaście ton załogowy lądownik Lunar Excursion Module zapadnie się w luźnym, nieskonsolidowanym pyłu, którego wielometrowa warstwa, jak podejrzewano, zalega na powierzchni Księżyca (McKay i in. 1991; Carrier i in. 1991). Jak jednak pokazały pierwsze bezzałogowe lądowniki, obawy te okazały się całkowicie bezzasadne.

Parametry geotechniczne księżycowego regolitu stanowiły przedmiot licznych analiz przeprowadzanych *in situ* przez bezałogowe lądowniki oraz na próbkach rdzeniowych dostarczonych na Ziemię w ramach programów Apollo oraz Łuna. Licznych pomiarów tych parametrów dokonywano również podczas stosunkowo długich przejazdów łazików Łunochod1 (10,5 km) i Łunochod2 (42 km) (Carrier i in. 1991; Wikipedia A).

W wyniku ożywionej dyskusji naukowej z początku lat 70-tych (Carrier 1974; Carrier i Heiken 1972; Costes i in. 1971; Mitchell 1973; Costes i in. 1972) ustalono, że:

- pierwsze kilka-kilkanaście milimetrów regolitu zdominowane jest przez bardzo drobne, luźno usypane cząstki tworzące rodzaj delikatnej skorupki zwanej „duricrust”; gęstość objętościowa tej powierzchniowej warstwy wynosi ok 1100–1300 kg/m³;
- gęstość objętościowa regolitu wykazuje początkowo bardzo szybki wzrost wraz z głębokością, przekraczając średnią wartość 1500 kg/m³ dla pierwszych 15 cm;
- tempo wzrostu maleje tu wykładniczo i gęstość objętościowa regolitu stabilizuje się na głębokości ok 50 cm przy wartości ~1800–1920 kg/m³ i dalej przyrasta już bardzo wolno;
- poniżej głębokości 70 cm występują niekiedy fluktuacje gęstości objętościowej będące zapisem gwałtownych procesów zachodzących na powierzchni Księżyca;
- powyższe zależności uważane są za prawdziwe do głębokości ~3 m, gdyż na taką właśnie głębokość sięgnęły najgłębsze odwierty wykonane na Księżycu. Obecnie niewiele wiadomo o własnościach geotechnicznych niżej położonego regolitu (Carrier i in. 1991).

Badania *in situ* wykonywane stożkowymi penetrometrami w ramach programów Apollo i Łunochod wykazały, że stopień zagęszczenia regolitu księżycowego wynosi od 63% do 95%, ze średnią wartością 83–84% (Mitchell i in. 1974).

Zależność średniego stopnia zagęszczenia (I_D) warstw regolitu od głębokości dla równinnych obszarów położonych między kraterami przedstawiono w tabeli 4.

Zalegający na powierzchni średnio zagęszczony grunt bardzo szybko przechodzi w stan zagęszczony, a następnie w bardzo zagęszczony, osiągając $I_D = 0,9$ już na głębokości 30 cm (Carrier i in. 1991). Księżycowy regolit na obszarach międzykraterowych jest naturalnie zagęszczony w stopniu porównywalnym z mechanicznie zagęszczonymi ziemskimi gruntami niespoistymi. Analizy śladów butów astronautów i kół pojazdów księżycowych wykazały, że górne warstwy regolitu na stokach wzniesień i wałach młodych kraterów są wyraźnie luźniejsze. Notowano tam minimalne wartości stopnia zagęszczenia 0,30–0,38. Średnią wartość stopnia zagęszczenia przypowierzchniowego regolitu na stokach kraterów oszacowano na 0,56. Analiza statystyczna śladów pozostawianych przez astronautów i sprzęt na zboczach wykazała znacznie większe odchylenie standardowe głębokości tych śladów w stosunku do danych zebranych na równym terenie, poza okolicami kraterów. Wskazuje to na większe zróżnicowanie warunków gruntowych w obrębie

Tabela 4. Typowe wartości stopnia zagęszczenia regolitu dla równinnych terenów międzykraterowych (Carrier i in. 1991).

Table 4. Typical values of lunar regolith degree of compaction for plain intercrater areas (Carrier i in. 1991).

Zagłębienie [cm]	Stopień zagęszczenia [-]
0–15	62–67%
0–30	70–78%
0–60	80–85%
30–60	90–95%

księżycowych kraterów, niż na międzykraterowych równinach (Carrier i Heiken 1972; Costes i in. 1971; Mitchell 1973; Costes i in. 1972).

Bez względu na rodzaj terenu, w każdym analizowanym przypadku księżycowy regolit wykazywał znacznie większe zagęszczenie, niż to, jakie mogłoby powstać naturalnie pod jego własnym ciężarem. Za przyczynę takiego stanu rzeczy uważa się uderzenia małych ciał niebieskich w powierzchnię Księżyca. Sejsmiczne fale uderzeniowe wywoływane tymi zjawiskami, od miliardów lat wstrząsają litosferą naszego satelity, sukcesywnie zagęszczając regolit pokrywający jego powierzchnię. Szczególną rolę przypisuje się tu składowej bombardowania związanej z mikro-meteoroidami i pyłem kosmicznym. Te małe, lecz stosunkowo liczne uderzenia, naruszają i mieszają najpłytsze warstwy regolitu, jednocześnie zagęszczając głębiej zalegający materiał (Carrier i in. 1973a, 1973b).

Podsumowanie i perspektywy

Środowisko powierzchni Księżyca w fundamentalny sposób różni się od środowiska ziemskiego. Brak atmosfery, hydrosfery i biosfery, przy jednoczesnym braku aktywności geologicznej sprawiają, że powierzchnia Księżyca jest obecnie kształtowana niemal wyłącznie przez procesy egzogeniczne, takie jak uderzenia małych ciał niebieskich oraz oddziaływanie pierwotnego promieniowania kosmicznego. Zjawiska impaktowe wnoszą kluczowy wkład w kształtowanie powierzchni Srebrnego Globu, nie tylko poprzez tworzenie struktur uderzeniowych, ale również jako główny proces odpowiedzialny za powstawanie i ewolucję księżycowego regolitu. Na obecnym etapie ewolucji Układu Słonecznego, częstotliwość uderzeń w powierzchnię Księżyca względnie dużych ciał niebieskich jest na tyle niska, że nasz naturalny satelita może być uznawany za doskonałe repozytorium wiedzy o historii naszego układu planetarnego. Planowane na drugą połowę obecnej dekady wznowienie załogowej eksploracji Księżyca z pewnością przyczyni się do lepszego zrozumienia egzotycznego środowiska Srebrnego Globu i przybliży ludzkość do ustanowienia długoterminowego pobytu na jego powierzchni. Wszelkie urządzenia i potencjalna infrastruktura mająca funkcjonować na powierzchni Księżyca musi być projektowana przy uwzględnieniu specyfiki tego, ukształtowanego przez procesy impaktowe, środowiska.

Streszczenie

W niniejszym artykule dokonano przeglądu wybranych zagadnień związanych z wpływem zjawisk impaktowych na krajobraz Księżyca oraz na własności regolitu pokrywającego jego powierzchnię. Przedstawiono tu podstawowe różnice występujące między środowiskiem ziemskim, a warunkami panującymi na powierzchni naszego naturalnego satelity. Różnice te są kluczowe dla zrozumienia roli, jaką uderzenia małych ciał niebieskich odgrywają dla kształtowania powierzchni Księżyca.

Materia kosmiczna bez żadnych przeszkód dociera do powierzchni pozbawionego atmosfery Księżyca, zderzając się z nią z prędkościami wyrażanymi w kilometrach na sekundę. Znaczna większość tej materii to mikrometeoroidy i pył kosmiczny, których uderzenia mają jedynie lokalne skutki. Potęgowy charakter rozkładu liczebności małych ciał Układu Słonecznego w funkcji ich masy sprawia, że częstotliwość uderzeń w powierzchnię Księżyca obiektów o masach powyżej kilograma jest bardzo niska. Na obecnym etapie ewolucji Układu Słonecznego, brak endogenicznych procesów zachodzących w księżycowej litosferze sprawia, że zjawiska impaktowe i wietrzenie kosmiczne są praktycznie jedynymi procesami kształtującymi powierzchnię Księżyca.

Słowa kluczowe: zjawiska impaktowe, Księżyc, księżycowy regolit, wietrzenie kosmiczne

Literatura

- Alshibli K., *Lunar Regolith*, <https://alshibli.utk.edu/research/LR/lr.php> [dostęp 17.02.2024].
- Bandfield J.L., 2011, *Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data*, *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116, E00H02.
- Bottke W.F., Durda, D.D., Nesvorny D. i in., 2005, *The fossilized size distribution of the main asteroid belt*, *Icarus*, 2005, 175(1) s. 111–140.
- Cadenhead D., Brown M.G., Rice D.K. i in., *Some surface area and porosity characterizations of lunar soils*, *Proceedings of the 8th Lunar Science Conference*, Houston, Texas, USA, 14-18.03.1977, s. 1291–1303.
- Carrier D., Olhoeft G.R., Mendell W., 1991, *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon: chapter 09: Physical properties of the lunar surface*, Lunar and Planetary Institute, Cambridge University Press, Houston, Texas, USA, 1991, ISBN 0-521-33444-6
http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter09.pdf [dostęp 18.02.2018].
- Carrier W.D., 1974, *Apollo drill core relationships*, *The Moon*, 1974, 10, s. 183–194.
- Carrier W.D., Heiken G., 1972, *Apollo 14 Lunar Surface Close-up Photography*, NASA TM X-58072, 1972, 51.
- Carrier W.D., Mitchell J.K., Mahmood A., 1973, *The nature of lunar soil*, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division by American Society of Civil Engineers*, 1973, 99, s. 813–832.
- Carrier W.D., Mitchell J.K., Mahmood A., 1973, *The relative density of lunar soil*, *Proceedings of the 4th Lunar Science Conference*, 1973, s. 2403–2411.
- Costes N.C., Cohron G.T., Moss D.C., 1971, *Cone penetration resistance test—An approach to evaluating the in-place strength and packing characteristics of lunar soils*, *Proceedings of the 2nd. Lunar Science Conference*, 1971, s. 1973–1987.
- Costes N.C., George E.B., Farmer J.E. i in., 1972, *Mobility Performance of the Lunar Roving Vehicle: Terrestrial Studies Apollo 15 Results*, NASA TR-R-401. 87, 1972.
- Durda D.D., Greenberg R., Jedicke R., 1998, *A new interpretation of the size distribution of main-belt asteroids*, *Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona*, 1998
<http://www.lpi.usra.edu/meetings/LPSC98/pdf/1680.pdf> [dostęp 26.02.2024].

Earth Impact Database

- http://passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/Index.html [dostęp 30.02.2024].
- etymonline.com *Regolith Origin and meaning of regolith*, Online Etymology Dictionary, <https://www.etymonline.com/search?q+=regolith> [dostęp 17.02.2024].
- Fa W., 2013, *Simulation for ground penetrating radar (GPR) study of the subsurface structure of the Moon*, Journal of Applied Geophysics, 2013, 99, s. 98–108.
- Gillis J.J., Spudis P.D., 1996, The Composition and Geologic Setting of Lunar Far Side Maria, Lunar and Planetary Science, 1996, 27, s. 413.
- Grieve R.A., 1983, *The impact cratering rate in recent time*, American Geophysical Union and NASA, Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, USA, 14-18.03.1983, Journal of Geophysical Research, 1984, Supplement, 89, s. 403–408.
- Hiesinger H., Head J.W., Wolf U. i in., 2003, *Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum*, Journal of Geophysical Research Planets, 2003, 108, 7 id5065.
- Hörz F., Grieve R., Heiken G., 1991, *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon: chapter4: Lunar surface processes*, Lunar and Planetary Institute, Cambridge University Press, Houston, Texas, USA, 1991, ISBN 0-521--33444-6
http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter04.pdf [dostęp 18.02.2018]
- Hurnik B., Hurnik H., 2005, *Materia Kosmiczna na Ziemi, jej źródła i ewolucja*, Wydawnictwo naukowe UAM w Poznaniu, Poznań 2005, ISBN 83-232-1510-3
- Korpikiewicz H., 1988, *Spadające Gwiazdy czyli Rzecz o meteorach i meteorytach*, Wyd. Krajowa Agencja Wydawnicza, Poznań 1988, ISBN 8303022725
- Lamlein D., 1977, *Lunar seismicity and tectonics*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1977, 14(3) s. 224–273.
- Langseth M.G., Keihm S.J., 1974, *In-Situ Measurements of Lunar Heat Flow Proceedings of The Soviet-American Conference on Cosmochemistry of the Moon and Planets*, Moskwa, ZSRR, 4-8.06.1974.
- Lucey P., Korotev R.L., Gillis J.J. i in., 2006, *Understanding the Lunar Surface and Space-Moon Interactions*, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, January 2006, 60(1), s. 83–219.
- Marcus A.H., 1965, *Positive stable laws and the mass distribution of planetesimals*, Icarus, 1965, 4(3), s. 267–272.
- McKay D.S., GHeiken G., Basu A., i in., 1991, *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon: chapter 7: The lunar regolith*, Lunar and Planetary Institute, Cambridge University Press, Houston, Texas, USA, 1991, ISBN 0-521-33444-6
http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter07.pdf [dostęp 18.02.2018].
- Meyer C., 2003, *NASA Lunar Petrographic Educational Thin Section Set: Lunar Regolith*, 2003, <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/letss/regolith.pdf> [dostęp 15.02.2024].
- Mighani S., Wang H., Shuster D.L., i in., 2020, *The end of the lunar dynamo*, Science Advances, 2020, 6(1), eaax0883.
- Minor Planet Center Archive Statistics: Orbits And Names,
<https://minorplanetcenter.net/iau/lists/ArchiveStatistics.html> [dostęp 14.03.2024].
- Mitchell J.K., 1973, *Soil mechanics. In Apollo 17 Preliminary Science Report*, NASA SP-330. 1973, s. 8–22.

- Mitchell J.K., Houston W.N., Carrier W.D., i in., 1974, *Apollo Soil Mechanics Experiment S-200, Final report*, NASA Contract NAS 9-11266, Space Sciences Laboratory Series, 1974, 15, 7.
- Muller P., Sjogren W., 1968, *Mascons: lunar mass concentrations*, *Science*, 1968, 161(3842), s. 680-684.
- Nakamura Y. i in., 1982, *Apollo Lunar Seismic Experiment-Final Summary*, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87(S01), s. 117-123.
- NASA 2006, *Bizarre Lunar Orbits*, NASA Science Mission Directorate, https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2006/06nov_loworbit [dostęp 18.02.2024].
- National Geographic, *Minerals and Gems*, <https://www.nationalgeographic.com/science/earth/inside-the-earth/minerals-gems/> [dostęp 05.02.2024].
- Noble S.K., Pieters C.M., Keller L.P., 2007, *An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering*, *Icarus*, 2007, 192(2), s. 629-642. doi:10.1016/j.icarus.2007.07.021
- O'Brien D.P.I., Greenberg R., 2003, *Steady-State Size Distributions for Collisional Populations: Analytical Solution with Size-Dependent Strength*, *Icarus*, 2003, 164, (2), s. 334-345.
- Papike J., Taylor L., Simon S., 1991, *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon: chapter 5: LUNAR MINERALS*, LUNAR AND PLANETARY INSTITUTE, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Houston, Texas, USA, 1991, ISBN 0-521-33444-6 http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter05.pdf [dostęp 18.02.2018].
- Robbins S.J., 2019, *A New Global Database of Lunar Impact Craters >1-2 km: 1. Crater Locations and Sizes, Comparisons With Published Databases, and Global Analysis*, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124, (4), s. 871-892.
- ScienceDirect (A) *Oort Cloud – an overview*, <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/oort-cloud> [dostęp 29.02.2024].
- ScienceDirect (B) *Space Weathering an overview*, <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/space-weathering> [dostęp 16.02.2024].
- Stanley S.M., 2002, *Historia Ziemi*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2002, ISBN 83-901-13625-1
- Suggs R., Moser D.E., Cooke W.J. i in., 2014, *The Flux of Kilogram-sized Meteoroids from Lunar Impact Monitoring*, *Icarus*, 2014, 238, s. 23-36.
- Taylor G.J., Warren P., Ryder G. i in., 1991, *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon: chapter 6: Lunar rocks*, Lunar and Planetary Institute, Cambridge University Press, Houston, Texas, USA, 1991, ISBN 0-521-33444-6 http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter06.pdf [dostęp 18.02.2018].
- Trilling D., Valdes F., Allen L., James D., Fuentes C., Herrera D., Axelrod T., Rajagopal J. 2017, *The size distribution of Near Earth Objects larger than 10 meters*, *The Astronomical Journal* 154(4).
- Vaniman D., Reedy R., Heiken G. i in., 1991, *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon: chapter 3: The lunar environment*, Lunar and Planetary Institute, Cambridge University Press, Houston, Texas, USA, 1991, ISBN 0-521-33444-6

- http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter03.pdf [dostęp 18.02.2018].
- Vanzani V., Marzari F., Dotto E., 1997, *Meteoroid impacts on the lunar surface*, w: Proceedings of The 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference, s. 481.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997LPI....28.1481V/abstract> [dostęp 26.03.2020].
- Vasavada A.R., Bandfield J.L., Greenhagen B.T. i in., 2012, *Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment*, Journal of Geophysical Research, 2012, 117, 12.
- Wang S., Wu Y., Blewett D., i in., 2017, *Submicroscopic metallic iron in lunar soils estimated from the in situ spectra of the Chang'E-3 mission*, Geophysical Research Letters, 2017, 44, 8 s. 3485–3492.
- Wikipedia (A), *Lunokhod programme*, https://en.wikipedia.org/wiki/Lunokhod_programme [dostęp 09.02.2024].
- Wikipedia (B), *Meteor czelabiński*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Meteor_czelabiński [dostęp 03.03.2024].