

WSTĘPNE UWAGI O SKAŁACH POWIERZCHNI KSIĘŻYCA

UKD 552.3:523.04(523.3)

Budowa, skład chemiczny i geneza Księżyca są przedmiotem żywego zainteresowania wielu badaczy. Pierwszych danych o składzie skał powierzchni Księżyca dostarczyły automatyczne stacje kosmiczne „Łuna” i „Surveyor”. Spektrometr scyntylicyjny umieszczony na pokładzie „Łuny-10” zarejestrował widmo promieniowania skał budujących „morza” i „kontynenty” Księżyca (9). Na podstawie podobieństwa intensywności promieniowania γ , powstającego w wyniku promieniotwórczego rozpadu K^{40} , Th i U w ziemskich skałach zasadowych oraz w skałach powierzchni Księżyca, przypisano tym ostatnim chemizm bazaltowy.

Analiza promieniowania γ pozwoliła także na stwierdzenie, na badanych obszarach, braku skał kwaśnych typu ziemskich granitów. Powyższe wnioski zostały potwierdzone przez wyniki analizy aktywacyjnej skał powierzchni Księżyca, wykonanej na stacjach kosmicznych „Surveyor” (11). Dzięki ostatnim badaniom stwierdzano nadto istnienie niewielkich różnic w chemizmie skał budujących księżycowe

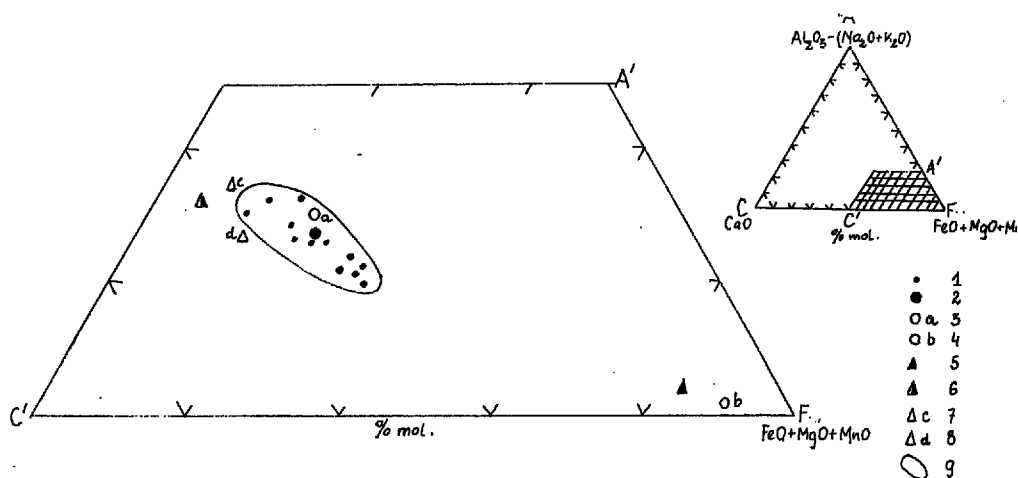
„morza” i „kontynenty”. Skały „mórz” są mianowicie bogatsze w żelazo niż skały „kontynentów”.

Przewrotu w badaniach materii Księżyca dokonała wyprawa statku kosmicznego „Apollo 11”. 25 lipca 1969 r. załoga tego statku dostarczyła na Ziemię 22 kg próbek skał z powierzchni Księżyca. Próbkę skał Księżyca, pod względem struktury i tekstury, zostały podzielone na cztery typy (5): A — drobnokrystaliczne porowate skały magmowe, B — średnikrystaliczne, kawerniste skały magmowe, C — brekcje i D — skały okruczowe (< 1 cm). Głównymi minerałami skał powierzchni Księżyca są: piroksen jednoskośny z serii pigeonit-augit, plagioklaz, zawierający 70—90% anortytu, wykazujący budowę pasową i częste zbliżniczenia oraz ilmenit. W skałach typu A i B udział piroksenów wynosi ok. 50% obj., a plagioklazów — ok. 30%. W skałach tych występują ponadto w zmiennych ilościach: oliwin, zawierający 65—75% forsterytu, krystobalit, szkliwo i minerały nieprzezroczyste (żelazo rodzime, troilit). Na uwagę zasługuje brak minerałów z grupą hydroksylową, który

Tabela I
SKŁAD CHEMICZNY SKAŁ POWIERZCHNI KSIĘŻYCA, NIEKTÓRYCH METEORYTÓW ORAZ ZIEMSKICH BAZALTÓW I PERYDOTYTÓW

	Skały Księżyca wg (5)		Skaleniowe achondryty (eukryty) wg Winogradowa (11)	Chondryty wg Winogradowa (11)	Perydotyty wg Winogradowa (11)	Bazalty toleitowe wg Winogradowa (11)	Oceaniczne bazalty toleitowe wg Kutolina (4)	Oceaniczne bazalty oliwinowe wg Kutolina (4)
	n=23	R	n=18	n=94	n=23	n=137	n=110	n=118
SiO ₂	41,0	36,0—45,0	48,5	38,4	43,54	50,83	49,15	45,83
Al ₂ O ₃	11,0	7,7—13,0	12,96	2,5	3,99	14,0	15,09	14,99
TiO ₂	9,5	7,0—12,5	0,6	0,11	0,05	2,03	2,09	3,06
ΣFe								
jako FeO	18,0	16,0—21,0	17,6	12,45	12,10	11,59	10,57	11,94
MgO	7,8	6,5—10,0	8,28	23,84	34,02	6,34	7,75	7,65
CaO	10,2	9,0—12,0	10,23	1,95	3,46	10,42	10,61	10,02
MnO	0,34	0,22—0,55	0,43	0,25	0,21	0,18	0,17	0,14
Na ₂ O	0,50	0,20—0,65	0,75	0,98	0,56	2,23	2,23	2,91
K ₂ O	0,15	0,06—0,22	0,24	0,17	0,25	0,16	0,30	1,18
H ₂ O			0,17	0,25	0,76	0,91		
Cr ₂ O ₃	0,55	0,31—0,95	0,38	0,36	0,34	0,40		

n — ilość analiz, R — rozstęp.



Dyc. 1. Punkty projekcyjne skał powierzchni Księżyca oraz meteorytów, bazaltów i perydotytów w trójkącie koncentracyjnym ACF P. Eskola.

Fig. 1. Projection points of rocks from Moon's surface, and of meteorites, basalts and peridotites in the concentration triangle ACF by P. Eskola.

Skały Księżyca: 1 — punkty projekcyjne skał powierzchni Księżyca, 2 — średnia z 23 próbek skał Księżyca; meteority: 3 — eukryty wg Winogradowa, 4 — chondryty wg Winogradowa; skały ziemskie: 5 — perydotyty wg Winogradowa, 6 — bazalty toleitowe wg Winogradowa, 7 — oceaniczne bazalty toleitowe wg Kutolina, 8 — oceaniczne bazalty oliwinowe wg Kutolina; 9 — pole zmienności skał powierzchni Księżyca.

Moon's rocks: 1 — projection points of Moon's surface rocks, 2 — mean of 23 samples of Moon's rocks; meteorites: 3 — eucrites according to Winogradow, 4 — chondrites according to Winogradow; Earth's rocks: 5 — peridotite according to Winogradow, 6 — toleite basalts according to Winogradow, 7 — oceanic toleite basalts according to Kutolin, 8 — oceanic olivine basalts according to Kutolin, 9 — variability field of Moon's surface rocks.

wskazuje na skrajnie niską wartość ciśnienia cząstkowego H₂O w środowisku krystalizacji omawianych skał.

achondrytów — eukrytów leżą na diagramach, przedstawionych na ryc. 1 i 2, w obrębie pól zmienności skał powierzchni Księżyca.

Analizy składu chemicznego próbek skał Księżyca zostały wykonane metodami spektralnej analizy emisyjnej (5). Wyniki analizy wskazują na brak istotnego zróżnicowania chemizmu skał powierzchni Księżyca. W tabeli I zestawiono porównawczo przeciętny skład analizowanych próbek ze średnim składem niektórych meteorytów oraz bazaltów i perydotytów ziemskich. Zmienność skał powierzchni Księżyca przedstawiono ponadto graficznie w trójkącie koncentracyjnym ACFm (ryc. 1) oraz na diagramach sporządzonych metodą Niggliego-Beckego-Bacona (ryc. 2). Pod względem zawartości pierwiastków głównych skały powierzchni Księżyca są zbliżone do niektórych achondrytów i bazaltów toleitowych. Punkty projekcyjne bogatych w wapń skaleniowych

Eukryty i skały księżycowe zawierają przeciętnie jednakowe ilości glinu, magnezu, żelaza, wapnia i alkaliów. Zawartość SiO₂ jest natomiast w omawianych skałach niższa niż w eukrytach i bazaltach toleitowych. Skały Księżycowe różnią się ponadto od bazaltów wyraźnie wyższą koncentracją FeO, niższą zaś — Na₂O. Cechuje je także wybitnie wysoka zawartość tytanu, niespotykana w pospolitych bazaltach i kamiennych meteorytach. Według Winogradowa (11) może być ona wynikiem wysokiej koncentracji FeO, a więc wzrostu możliwości izomorficznego wchodzenia tytanu do minerałów żelaza.

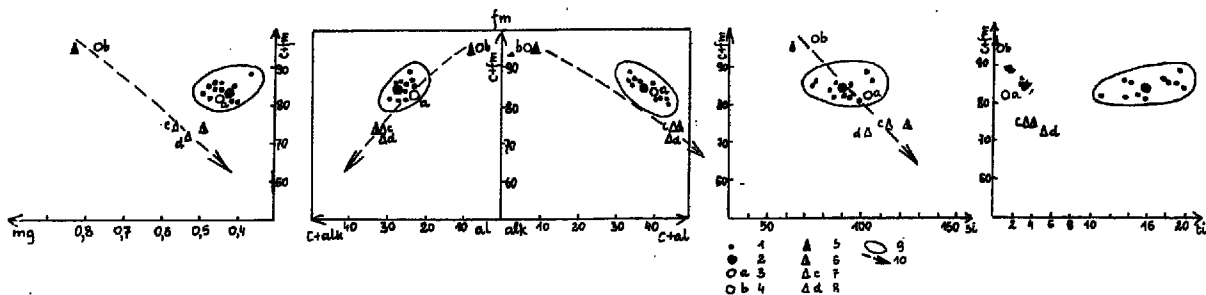
Koncentracje pierwiastków śladowych, z wyjątkiem lantanowców, były także oznaczone metodami spektralnej analizy emisyjnej (tab. II). Lantanowce

Tabela II

PIERWIĄTKI ŚLADOWE W SKAŁACH POWIERZCHNI KSIĘŻYCA, NIEKTÓRYCH METEORYTACH ORAZ ZIEMSKICH BAZALTACH I PERYDOTYTACH

	Skały powierzchni Księżyca wg (5)		Skaleniowe achondryty (eukryty) wg Winogradowa (11) n=18	Chondryty wg Winogradowa (11) n=94	Perydotyty wg Winogradowa (11) n=23	Bazalty toleitowe Winogradowa (11) n=137	Bazalty wg Turekiana i Wedepohla (6)
	n=23	R					
Sc	88	45—170	35	6	1,5	61	30
V	36	20—80	50	70	40	290	250
Cr	3700	2100—4800	2600	2460	2320	274	170
Mn	2700	1700—4300	3320	1930	1620	1400	1500
Co	12	3—22	40	800	200	32	48
Ni	200	0—320	1000	13500	2000	97	130
Cu	6	0—10	—	150	20	77	87
Sr	105	55—230	80	10	10	130	460
Ba	80	50—180	30	6	1	14	300
Zr	800	250—2000	60	30	30	100	140
Th	2,5	0—3,4	0,5	0,040	0,015	0,5	
U	0,65	0—0,78	0,2	0,025	0,005	0,1	

n — ilość analiz, R — rozstęp.



Ryc. 2. Projektcja skał powierzchni Księżyca, meteorytów, bazaltów i perydotytów metodą Niggli-Becke — Bacona.

Fig. 2. Projection of Moon's surface rocks, meteorites, basalts and peridotites by Niggli-Becke-Bacon's method.

Skaly Księżyca: 1 — punkty projekcyjne skał powierzchni Księżyca, 2 — średnia z 23 próbek skał Księżyca; meteority: 3 — eukryty wg Winogradowa, 4 — chondryty wg Winogradowa; skały ziemskie: 5 — perydotyty wg Winogradowa, 6 — bazalty toleitowe wg Winogradowa, 7 — oceaniczne bazalty toleitowe wg Kutolina, 8 — oceaniczne bazalty oliwinowe wg Kutolina; 9 — pole zmienności skał powierzchni Księżyca, 10 — kierunki różnicowania materii chondrytowej w procesie ewolucji planet typu Ziemi.

Moon's rocks: 1— projection points of Moon's surface rocks, 2 — mean of 23 samples of Moon's rocks; meteorites: 3 — eucrites according to Winogradow, 4 — chondrites according to Winogradow; Earth's rocks: 5 — peridotites according to Winogradow, 6 — toleite basalts according to Winogradow, 7 — oceanic toleite basalts according to Kutolin, 8 — oceanic olivine basalts according to Kutolin, 9 — variability field of Moon's surface rocks, 10 — trends in differentiation of chondrite substance in the evolution process of planets of Earth's type.

w skałach Księżyca analizował Haskin (3). Autor ten oznaczył zawartości 12 pierwiastków ziem rzadkich w 9 próbkach metodą aktywacji neutronowej i pomiaru promieniowania γ . Koncentracje Pr, Tm i Y w próbkach księżycowych zostały obliczone ze stosunków korelacyjnych pierwiastków ziem rzadkich metodą Bałaszowa (informacje ustne). Przeciętne zawartości lantanowców w skałach Księżyca, meteorytach oraz bazaltach i perydotytach zestawiono w tabeli III.

Z analizy danych zawartych w tabelach II i III wynika, że skały powierzchni Księżyca charakteryzują się wysoką zawartością Zr, Cr, Y i lantanowców oraz stosunkowo niskimi koncentracjami takich metali przejściowych, jak: Ni i Co. Badane skały cechuje nadto wyraźna przewaga pierwiastków ziem rzadkich grupy itrowej nad cerową, zbliżona do analogicznego stosunku stwierdzonego w meteorytach, intensywniejsze niż w chondrytach względnie nagromadzenie najcięższych lantanowców, na co wskazuje wysoka wartość stosunku $Yb/Er = 0,96$ oraz wybitny

względny deficyt europu, niespotykany w meteorytach, ani w pospolitych bazaltach (ryc. 3). Stosunek Sm/Eu wynosi bowiem średnio w skałach Księżyca 7,9, w meteorytach — ok. 3, zaś w bazaltach — przeciętnie 2,6. Skały księżycowe nie podlegają zaobserwowanej w skałach ziemskich prawidłowości, która wiąże wzrost ogólnej zawartości pierwiastków ziem rzadkich ze wzrostem przewagi lżejszych lantanowców nad ciężkimi (1).

Zbadane próbki skał powierzchni Księżyca mają niewątpliwie ograniczoną reprezentatywność. Stanowią one niemniej bardzo cenny materiał, pozwalający na wstępną weryfikację hipotez o pochodzeniu i sposobie różnicowania się pramaterii Księżyca. Źródła macierzystej materii Księżyca dopatrują się uczeni bądź w substancji, która mogła się oddzielić od Ziemi, bądź też w pasie asteroid (3, 10, 11).

Zgodnie z pierwszą hipotezą materia Księżyca mogła oddzielić się od Ziemi po jej strefowym różnicowaniu na jądro, płaszcz i częściowo skorupę, ponieważ średnia gęstość substancji księżycowej

Tabela III
PIERWIASTKI ZIEM RZADKICH W SKAŁACH POWIERZCHNI KSIĘŻYCA, NIEKTÓRYCH METEORYTACH ORAZ W BAZALTACH I PERYDOTYTACH

	Skały powierzchni Księżyca wg Haskina (3)		Skaleniowe achondryty (eukryty) wg Haskina i in. (2) n=4	Chondryty wg Haskina i in. (2) n=20	Wysoko- tempera- turowe peridotyty wg Haskina i in. (2) n=3	Oceaniczne bazalty toleitowe wg Haskina i in. (2) n=7	Bazalty wg Haskina i in. (2) n=213
	n=9	R					
La	18,2	6,7—23,2	3,7	0,30	0,0051	4,3	17
Ce	51,4	22,5—75,0	9,7	0,84	0,073	15,0	66
Pr	8,9	4,1—13,0	1,4	0,12	0,0070	2,5	8,5
Nd	46	21—69	7,0	0,58	0,095	14,0	32
Sm	15,0	7,9—21,2	2,3	0,21	0,052	4,7	6,9
Eu	1,9	1,5—2,2	0,72	0,074	0,030	1,8	2,7
Gd	20	12—26	3,1	0,32	0,13	7,1	5,9
Tb	3,6	2,1—5,0	0,57	0,049	0,066	1,3	1,1
Dy	24,8	17,8—34,7	3,8	0,31	0,11	6,8	5,7
Ho	4,9	2,9—7,0	0,80	0,073	0,056	1,7	1,1
Er	14	9—19	2,3	0,21	0,17	4,9	3,3
Tm	2,0	1,3—2,9	0,38	0,033	0,031	0,8	0,4
Yb	13,4	8,6—18,8	2,0	0,17	0,30	4,0	2,7
Lu	2,0	1,3—2,7	0,35	0,031	0,022	0,7	0,4
Y	124	79 173	22	1,8	1,3	39	25
ΣTR	350		60,2	5,11	2,484	108,6	178,7
$\frac{\Sigma Ce}{\Sigma Y}$	0,68		0,70	0,71	0,12	0,64	2,92

n — ilość analiz, R — rozstęp.

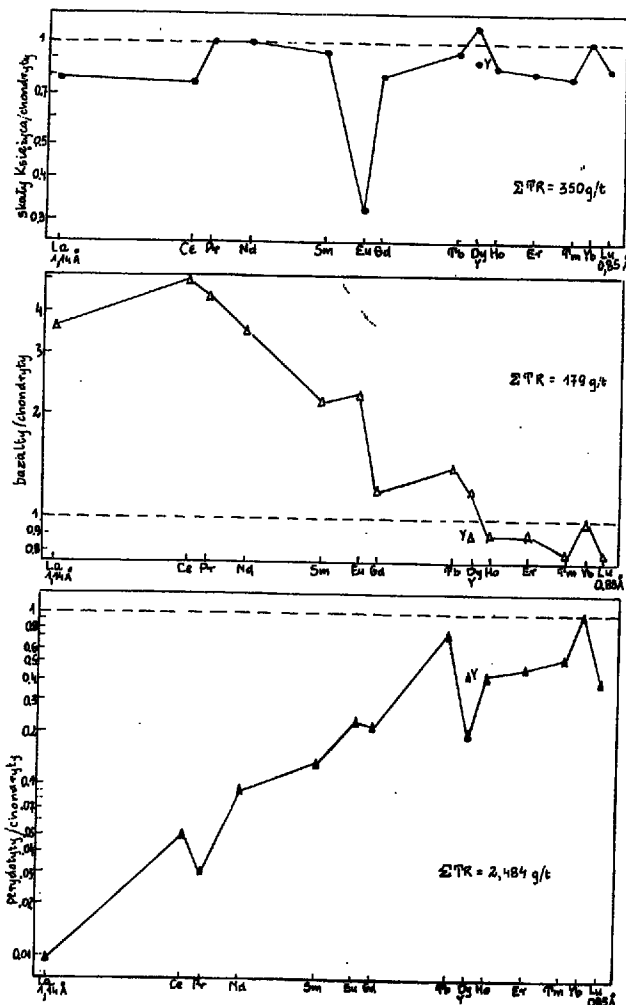
Ryc. 3. Porównawcze rozkłady pierwiastków ziem rzadkich w skałach Księżyca, bazaltach i wysokotemperaturowych peridotytach. Zawartości poszczególnych lantanoców i Y normowano względem Yb = 1,00.

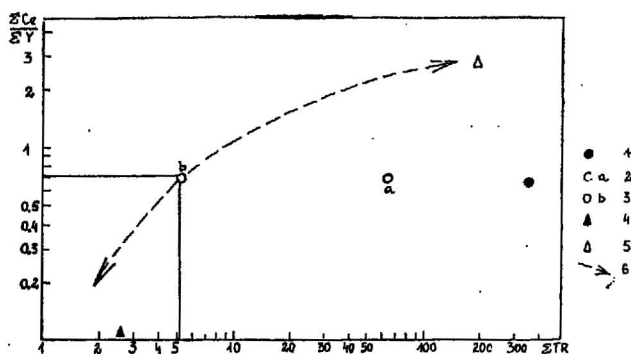
Fig. 3. Comparison of distribution of rare earth elements in Moon's rocks, basalts and high-temperature peridotites. Content of the individual lanthanides and of Y have been referred according to Yb = 1,00.

(3,34 g/cm³) jest znacznie niższa niż ziemskiej (5,5 g/cm³). Księżyc powinien więc składać się z materii płaszczą i częściowo skorupy ziemskiej. W świetle tej hipotezy nie znajdują jednak wyjaśnienia różnice w chemizmie skał powierzchni Księżyca i ziemskich bazaltów, które byłyby produktami dyferencjacji tej samej materii macierzystej. Pierwsze dane dotyczące wieku bezwzględnego skał Księżyca nie wnoszą niestety nic nowego do tej hipotezy. Wiek niektórych księżycowych skał magmowych, oznaczony metodą potasowo-argonową, waha się od 3 do 4 mld lat (5), co absolutnie nie wyklucza możliwości występowania na Księżycu skał starszych niż najstarsze skały ziemskie.

Zgodnie z drugą hipotezą Księżyc może pochodzić z pasa asteroid, a jego pramateria powinna mieć skład chondrytów ubogich w fazę metaliczną i bogatych w żelazo w fazie krzemianowej (11), bądź — achondrytów (3). Skały występujące na powierzchni Księżyca, zbliżone składem do skaleniowych achondrytów, powstały prawdopodobnie we wczesnym stadium ewolucji pramaterii, prowadzącej do jej strefowego zróżnicowania. W związku z tym przypuszczenie, że spadające na Ziemię bogate w wapń achondryty pochodzą z powierzchni Księżyca, staje się prawdopodobne.

Księżyc jest zróżnicowanym, chociaż przypuszczalnie pozbawionym metalicznego jądra ciałem niebieskim (11). Świadczą o tym różnice gęstości skał powierzchniowych i całego Księżyca, anomalie grawitacyjne i ślady wulkanizmu. Zdaniem Winogradowa (7, 8), ewolucja planet typu Ziemi, prowadząca do





Ryc. 4. Zmienność pierwiastków ziem rzadkich w procesie ewolucji materii chondrytowej na diagramie Bałaszowa.

1 — średnia dla skał powierzchni Księżyca wg Haskina, 2 — eukryty wg Haskina i in., 3 — chondryty wg Haskina i in., 4 — wysokotemperaturowe perydotyty wg Haskina i in., 5 — bazalty wg Haskina i in., 6 — kierunek zróżnicowania TR w procesie ewolucji planet typu Ziemi.

Fig. 4. Variability of rare earth elements in the evolution process of chondrite substance on Balashov's diagram.

1 — mean for Moon's surface rocks according to Haskin, 2 — eucrites according to Haskin et al., 3 — chondrites according to Haskin et al., 4 — high-temperature peridotites according to Haskin et al., 5 — basalts according to Haskin et al., 6 — trends in TR differentiation in evolution of planets of the Earth's type.

ich strefowego zróżnicowania, polega na frakcjonalnym wytapianiu z materii chondrytowej łatwotopliwych składników według mechanizmu strefowego topnienia. Istotą procesu strefowego topnienia jest wielokrotne przechodzenie ciepła w jednym kierunku, które powoduje zróżnicowanie substancji na ruchliwe „topniki” i bezwładną, trudnotopliwą pozostałość, niepodlegającą upłynnianiu. Dyferencjacja materii ziemskiej zachodziła pod wpływem ciepła radiogenicznego wydzielanego w płaszczu w wyniku rozpadu K^{40} , Th i U.

Proces frakcjonalnego upłynniania, pierwotnie jednorodnej, chondrytowej substancji płaszczu doprowadził do jej rozdzielania na trudnotopliwe dunity, skupiające Mg, Fe, Ni, Co, Cr i platynowce oraz bazalty, bogate w takie łatwotopliwe składniki jak krzemionka, alkalia, wapń, tytan i lantanowce. Hipotezę różnicowania się materii planet na drodze frakcjonalnego wytapiania, potwierdzają wskaźniki geochemiczne, oparte głównie na pierwiastkach ziem rzadkich. Widma rozmieszczenia lantanowców w perydotytach z wysokotemperaturowych intruzji oraz w bazaltach dopełniają się nawzajem do rozkładu tych pierwiastków w chondrytach (ryc. 3).

Decydująca rola strefowego topnienia w procesie różnicowania się skał Księżyca wynika także z rozważań Haskina (3). Autor ten wykorzystując zjawisko względnego deficytu europu oraz modele matematyczne, opisujące zachowanie się pierwiastków śladowych w procesach dyferencjacji magmowej

SUMMARY

On the basis of chemical properties of rock samples taken from the Moon's surface by the crew of the space ship „Apollo 11”, a review and verification of the hypotheses on the origin and the differentiation mode of the lunar substance has been presented.

According to the present author, the most probable hypothesis is that the Moon's primitive matter, resembling achondrites or chondrites poor in metallic phase, comes from an asteroid zone and has been differentiated by fractional liquefaction, according to the action of zonal melting.

doszedł do wniosku, że materia Księżyca różnicowała się według mechanizmu strefowego topnienia, a nie frakcyjnej krystalizacji.

Zdaniem autorki, w świetle obecnego stanu wiedzy o skałach powierzchni Księżyca, najbardziej prawdopodobna jest hipoteza o pochodzeniu pramaterii tego ciała niebieskiego z pasa asteroid i jej różnicowaniu się na drodze frakcjonalnego upłynniania, zachodzącego według mechanizmu strefowego topnienia. Hipotezę tę potwierdzają m. in.:

- 1) chemizm księżycowych skał, różny od bazaltów ziemskich pod względem koncentracji żelaza, alkaliów i krzemionki (tab. I, ryc. 1 i 2);
- 2) wysoka zawartość pierwiastków ziem rzadkich, niespotykana w pospolitych zasadowych skałach magmowych Ziemi;
- 3) odchylenia punktów projekcyjnych skał Księżyca od krzywych ilustrujących kierunki zróżnicowania materii chondrytowej w procesie ewolucji płaszczu Ziemi (ryc. 2 i 4);
- 4) zgodność rozkładu lantanowców z matematycznymi modelami, opisującymi zachowanie się pierwiastków śladowych w procesie strefowego topnienia skał (3).

Materia Księżyca, mająca skład achondrytów, bądź chondrytów ubogich w fazę metaliczną, pochodzi więc przypuszczalnie z pasa asteroid i znajduje się we wczesnym stadium dyferencjacji, zachodzącej według mechanizmu strefowego topnienia.

LITERATURA

1. Bałaszow Ju. A. — Ob analogii razdzielenija riedkoziemielnych elementow w mieteoritach i porodach ziemnoj kory. Problemy geochimii. Moskwa, 1965.
2. Haskin L. A., Frey F. A., Schmitt R. A., Smith R. H. — Meteoritic, solar and terrestrial rare-earth distributions. New York, London, Paris, 1966.
3. Haskin L. A. — Rare-Earth Elements in Apollo 11 Returned Lunar Samples. Science, 1970 (w druku).
4. Kutolin W. A. — Statisticheskoe izuczenije chimizma bazaltow. Moskwa, 1969.
5. Preliminary Examination of Lunar Samples from Apollo 11. Science, v. 165, No 3899, 1969.
6. Turekian K. K., Wedepohl K. H. — Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. Bull. Geol. Soc. Amer. 72, 175, 1961.
7. Winogradow A. P. — Proischozhdienije obołoczek ziemli. Izv. AN SSSR, ser. geol. 1962, nr 11.
8. Winogradow A. P., Jaroszewskij A. A. — O fizicheskich usłowijach zonnogo pławlenija w obołoczках ziemli. Geochimija, 1965, nr 7.
9. Winogradow A. P., Surkow Ju., A. i in. — Izmerlenija gamma-izluczenija lunnoj powierzchni na kosmicheskoj stancii Luna-10. Geochimija, 1966, nr 8.
10. Winogradow A. P. — O sostawie porod Luny. Geochimija, 1969, nr 10.
11. Winogradow A. P. — K proischozhdieniju lunnych porod. Geochimija, 1970, nr 1.

РЕЗЮМЕ

На основании химизма образцов пород лунной поверхности, доставленных экипажем космического корабля „Аполлон 11”, анализируются гипотезы, касающиеся происхождения и дифференциации лунной материи.

По мнению автора, наиболее вероятна гипотеза, утверждающая, что первичная материя Луны ахондритового или хондритового состава с небольшой примесью металлической фазы происходит из полосы астероидов и дифференцировалась путем фракционированного расплавления согласно механизму зонального плавления.