

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.10>

УДК 549.6

Типоморфизм породообразующих минералов лунного реголита, станций Луна-16, -20, -24, сравнение море-континент-море

А.Б. Макеев^{1}, Н.И. Брянчанинова²*¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия²Геологический институт РАН, Москва, Россия

Изучены химические и минералогические особенности лунного реголита (электронные микроскопы JXA-8200 и JSM-5610LV, 400 анализов, 50 BSE изображений, 9 фрагментов послонных проб керна) в местах посадок станций Луна-16, -20, -24 для сравнения обстановок море-континент. Диагностировано 18 минеральных фаз и 12 их разновидностей. Наиболее широко распространены железо-магниево-кальциевые силикаты: анортит, клинопироксен и оливин. Обсуждаются типоморфные особенности породообразующих минералов в двух типах лунной поверхности. Для отображения составов лунных хромшпинелидов предложена диаграмма в виде развертки треугольной призмы.

Ключевые слова: Луна, советские автоматические станции, лунный реголит, море Изобилия, Кризисов, анортит, клинопироксен, оливин, ильменит, морские базальты, оливковое габбро

Для цитирования: Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. (2021). Типоморфизм породообразующих минералов лунного реголита, станций Луна-16, -20, -24, сравнение море-континент-море. *Георесурсы*, 23(1), с. 94–105. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.10>

Введение. Несмотря на выдающиеся достижения американских и российских ученых в изучении минералогии Луны, которые изложены в многочисленных монографиях и статьях (Барсуков, 1977; Богатилов, Макеев, 2012; Грунт..., 1979; Лунный грунт..., 1980; Хисина, 1987; Магматизм..., 1990; Малышева, 1980; Мохов, Карташов, Богатилов, 2007; Хеггерти, 1979; Фрондел, 1978; The Moon..., 1977; и др.), бывает полезно вернуться к изучению отложенных препаратов и образцов в связи с новыми подходами, техническими и аналитическими возможностями. В настоящее время на поверхности Луны диагностировано около 100 минеральных видов (Фрондел, 1978, Мохов и др., 2007). Нами в исследуемом материале определена только пятая часть этих минеральных видов. Целью настоящей работы является не пополнение списка диагностированных минералов, а выявление типоморфных особенностей главных породообразующих минералов на материале керна трех автоматических станций в профиле море-континент-море.

Проведено исследование состава лунных пород и минералов из реголита станций Луна-16, -20, -24 с целью сравнения минерального состава и сопоставления типохимических особенностей породообразующих минералов лунных пород в трех районах от моря Изобилия через континентальную область к морю Кризисов. Получены более 50 электронно-микроскопических изображений частиц (рис. 1–3) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE – backscattered electrons), и определен состав минеральных фаз реголита (в полированных препаратах), более 400 оригинальных микрозондовых анализов на электронном микроскопе JEOL JXA-8200 с 5-ю

волновыми спектрометрами и растровым электронным микроскопе JSM-5610LV с энергодисперсионной приставкой в стандартных условиях анализа. Диагностировано 18 минеральных фаз и 12 их разновидностей (табл. 1), часть оригинальных новых анализов представлена в таблицах 2–6. Пересчет состава минералов на миналы и кристаллохимические коэффициенты в таблицах 2–6 производился методом зарядов.

Рассмотрим распространение петрографических типов горных пород на поверхности Луны в створе профиля станций Луна-16, -20, -24. По электронно-микроскопическим изображениям препаратов зерен реголита (рис. 1–3), а именно по их минеральному составу, соотношению минералов и структурно-текстурным особенностям можно диагностировать типы горных пород. На территории лунных морей (станции Луна-16, -24) наиболее распространены осколки зерен базальтов, оливковых базальтов, оранжевые и зеленые стекла, породы со следами ударного воздействия и частичного плавления (пузыристые базальты, брекчии, агломераты), а также мелкие осколки главных породообразующих силикатов – оливина, плагиоклаза и клинопироксенов. На континентальной части Луны (Луна-20) состав пород коренным образом отличается: преобладают габбро, оливковое габбро, верлиты. По литературным данным в материковых областях широко распространены анортозиты с розовой шпинелью, породы «Mg-suite» – дуниты, троктолиты, нориты, габбро-нориты, а на обратной стороне Луны возможны выходы мантийных пород лерцолитов (Prissel et al., 2014).

Весьма вероятно, что сбор зерен лунного реголита в точке наблюдения автоматических станций происходит с площади нескольких гектаров. Метеоритная бомбардировка поверхности приводит к послонному накоплению осколков местных горных пород и перемешиванию этого материала. Крупные куски пород, вероятно, могут

* Ответственный автор: Александр Борисович Макеев
e-mail: abmakeev@mail.ru

© 2021 Коллектив авторов

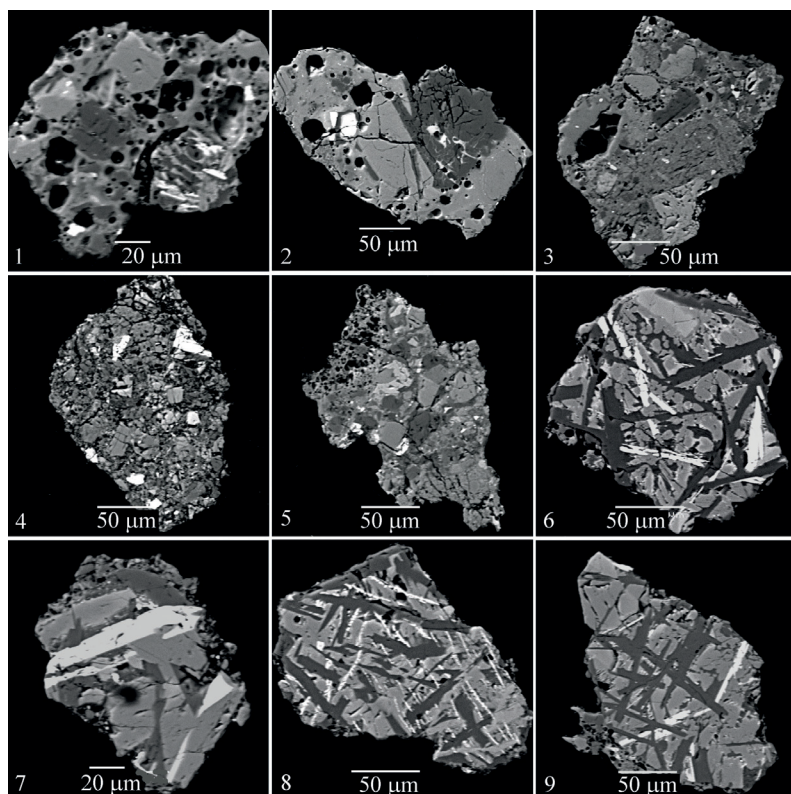


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения (BSE) зерен реголита Луна-16. 1–5 – пузыристая брекчия морского базальта ($Cpx>Pl>Ol>Gls$); 6–9 – оливиновый базальт ($Cpx>Pl>Ol$), удлиненные выделения оливина со спинифекс структурой. Главные породообразующие минералы: оливин (белый), клинопироксен (светло-серый), плагиоклаз-анортит (темно-серый), стекло (темное).

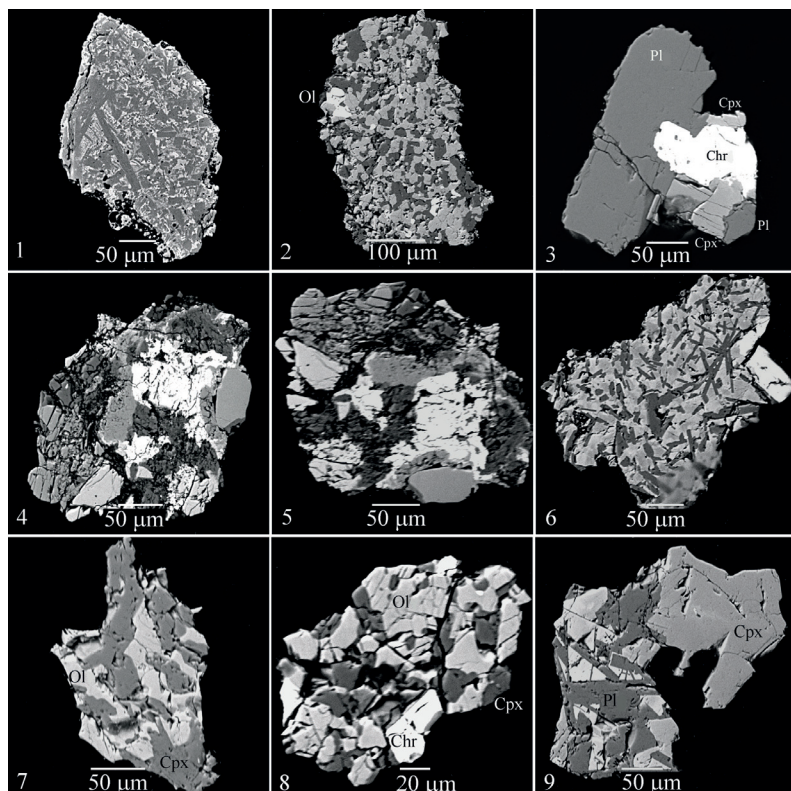


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения (BSE) зерен лунного реголита Луна-20. 1 – афанитовое габбро; 2, 3 – габбро с хромшпинелидом (алюмохромитом); 4, 5 – брекчированное оливиновое габбро ($Ol>Cpx>Pl$); 6 – оливиновое габбро ($Cpx>Pl>Ol$); 7 – верлит ($Cpx=Ol$); 8 – брекчированный верлит ($Ol>Cpx>Chr$); 9 – габбро ($Cpx>Pl$).

отлетать и дальше, а мелкий материал псефитовой и алевритовой фракций остается близко от места удара. О том, что материал, доставленный на Землю автоматическими станциями, довольно однородный, известно из материалов исследования химического состава керна, проанализированного множеством мелких проб, взятых на разной глубине керна (Барсуков, 1977; Bell et al., 1978; Taylor et al., 1978; и др.). Для определения среднего минерального состава первичных пород (на примере реголита Луна-24) мы провели нормативный минеральный пересчет 40 полных химических анализов, выполненных на материале колонки керна в привязанных послойных пробах из нескольких опубликованных работ, причем в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского анализы произведены мокрым химическим методом, а в зарубежных научных центрах – рентгенофлуоресцентным методом. В ходе пересчетов использованы полученные нами средние составы породообразующих минералов (табл. 2–4). Методика нормативного пересчета: 1. Содержание плагиоклаза

Породообразующие	Л-16	Л-20	Л-24	Σ
Анортит	13	17	16	46
Битовнит	9	–	–	9
Форстерит	–	2	1	3
Гортонолит 0.20-0.80 (Fa)	13	11	16	40
Фаялит	–	2	4	6
Авгит	13	5	21	39
Ферроавгит	5	7	22	34
Субкальциевый авгит	3	5	11	19
Субкальциевый ферроавгит	8	10	22	40
Магнезиальный пизжонит	2	–	4	6
Промежуточный пизжонит	3	4	7	14
Железистый пизжонит	–	1	1	2
Геденбергит	3	2	10	15
Ферросалит	2	–	–	2
Пироксферроит	4	–	–	4
Клиноэнстатит	–	–	1	1
Ортопироксен - бронзит	–	3	–	3
Итого:	78	69	136	283

Аксессуары	Л-16	Л-20	Л-24	Σ
Хромит, хромшпинелиды	–	3	9	12
Субтитаноалюмохромит	–	1	2	3
Субтитаносубалюмохромит	–	2	6	8
Ульвошпинель	5	8	2	15
Хром-ульвошпинель	21	1	10	32
Ильменит	1	1	1	3
Самород. железо, Камасит	1	1	1	3
Тэнит ($Fe_{0.75}Ni_{0.25}$)	1	2	14	17
Троилит	4	–	–	4
Пирротин	1	–	–	1
Транквилит	1	–	–	1
Витлокит	–	1	1	2
Кварц (SiO_2)	3	3	3	9
Стекло базальтовое	9	–	–	9
Стекло (типа гранат)	–	–	–	–
Итого:	47	22	49	118

Табл. 1. Встречаемость минеральных фаз и их разновидности (число анализов) в лунном реголите в месте посадок станций Луна-16, -20, -24. Разновидности минералов выделены курсивом.

рассчитывается из количества Na_2O в анализах проб; 2. Рассчитывается количество CaO в уже определенном плагиоклазе; 3. От общего количества CaO вычитается рассчитанный кальций в плагиоклазе; 4. Из остатка CaO рассчитывается нормативное содержание клинопироксена (используя его средний состав из табл. 2); 5. Содержание базальтового стекла в породах принимается 4 об.%, его состав известен из работы (Bell et al., 1978), он близок к составу собственно клинопироксена; 6. Содержание оливина рассчитывается как остаток от трех ранее определенных компонентов ($\text{Ol} = 100 - \text{Pl} - \text{Cpx} - \text{Gls}$). В результате установлено наличие в керне Луна-24 трех первичных горных пород: безоливинового базальта ($n=24$ Pl – 36, Cpx – 60, Gls – 4 об.%); оливинового базальта ($n=11$ Pl – 40, Cpx – 42, Ol – 14, Gls – 4 об.%); пикробазальта и пикрита ($n=5$ Pl – 25, Cpx – 29, Ol – 42, Gls – 4 об.%).

Результаты исследований. Все изученные частицы реголита представляют собой обломки лунных пород размером 100–500 мкм с сохранившейся микрозернистой структурой с набором минералов характерных для оливиновых базальтов, габбро, верлитов, шлакоподобных частиц, брекчий и других пород (рис. 1–3). Зерна пород и минералов трещиноватые, обломки пород имеют раковистый излом, зерна минералов, обладающие спайностью – расколоты по спайности. Обломки метеоритного вещества нами не встречены. Кроме зерен обломков пород встречаются обломки крупных частиц (50–450 мкм) тех же лунных минералов из базальтов и других пород – анортита, оливина, пироксенов, которые имеют преимущественное распространение. Рудные минералы: самородные металлы, оксиды и сульфиды с размером 1–50 мкм встречаются только в виде включений в других силикатных минералах. Важно отметить цвет трех наиболее распространенных силикатных минералов, наблюдаемый под бинокляром и в петрографическом микроскопе в «темном поле»: анортит – серый, темно-серый; оливин – темно-зеленый, коричневый; клинопироксен – коричневый (рис. 3 9), темно-коричневый (из-за высокой железистости). Именно этот факт придает характерный коричневый цвет реголита лунной поверхности на современных цветных космических снимках.

Реже встречаются спекшиеся микробрекчии пород и с теми же минералами (рис. 1 3–5; рис. 2 4–5), базальты с характерной (рис. 1 6, 7) спинифекс-формой выделений оливина, округлые обломки базальтового стекла (рис. 3 8с), в котором диагностируются микрокристаллы анортита и оливина, определен состав двух частиц *геденбергита* (рис. 3 5, 6) с ламелями оливина-фаялита и включениями ильменита и троилита. Микрозернистая структура обломков морских базальтов в лунном реголите свидетельствует об очень быстрой кристаллизации базальтов.

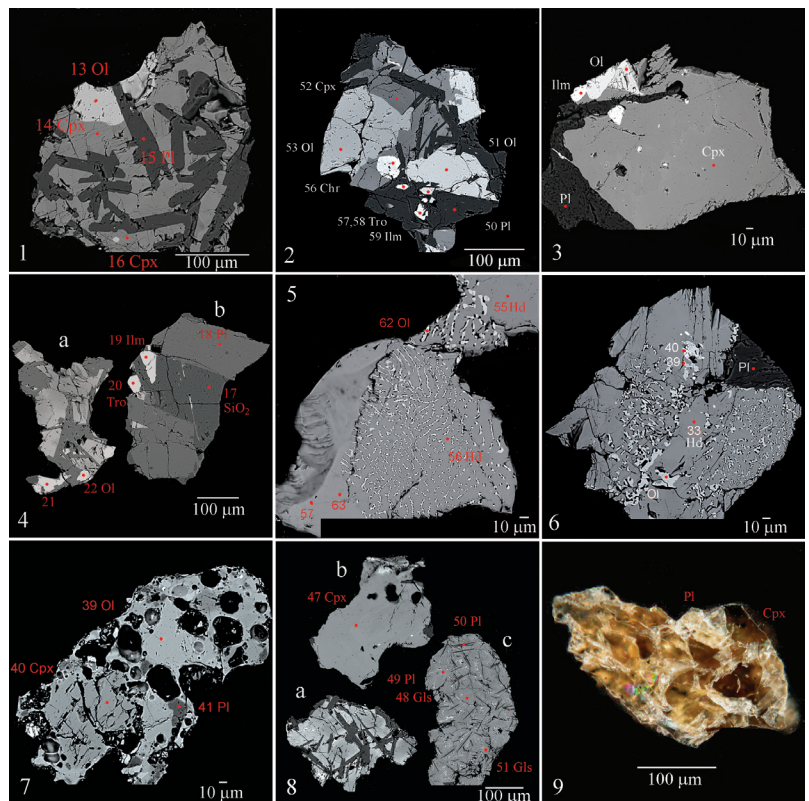


Рис. 3. Электронно-микроскопические (1–8), режим BSE и оптическое (9) изображения зерен реголита Луна-24. 1–3, 4(а) – оливиновый базальт с ильменитом и троилитом; 4 (b) – «кварцевый» прожилок в плагиоклазе с ильменитом и троилитом; 5, 6 – структуры жидкостной несовместимости оливин-пироксенового расплава; 7 – пузыристый базальт; 8 – (а) базальт ($\text{Cpx} > \text{Pl}$), (b) клинопироксен, (с) базальтовое стекло; 9 – базальт ($\text{Cpx} > \text{Pl}$), петрографический микроскоп темнопольное изображение, пироксен (коричневый), анортит (белый). Отмечены точки микрозондовых анализов. Cpx – клинопироксен; Chr – субтитаноалохромит; Hd – геденбергит; Gls – стекло; Ilm – ильменит; Ol – оливин (гортонит и фаялит); Pl – анортит; Tro – троилит.

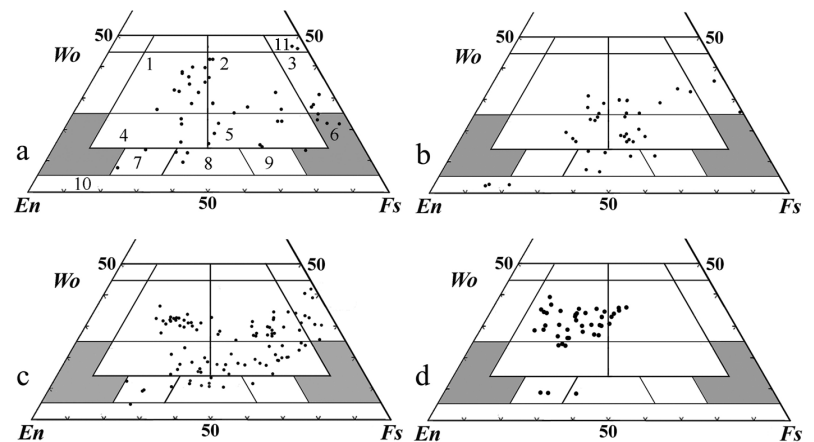


Рис. 4. Диаграммы составов пироксенов лунного реголита: а – Луна-16, b – Луна-20, с – Луна-24, и земных (d) толеитовых базальтов (Макеев, Брячанинова, 2012). 1 – авгит, 2 – ферроавгит, 3 – геденбергит, 4 – субкальциевый авгит, 5 – субкальциевый ферроавгит, 6 – пироксферроит, 7 – магнезиальный пизонит, 8 – промежуточный пизонит, 9 – железистый пизонит, 10 – клиноэнстатит, 11 – ферросалит.

Анализ изображений (структур и текстур) пород позволяет предположить последовательность выделения минералов в лунном оливиновом базальте: 1) оливин, хромшпинелид → 2) клинопироксен → 3) плагиоклаз (анортит) → 4) ильменит, ульвошпинель, сульфиды (троилит и др.).

Станция Луна-16

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Сред.
SiO ₂	47,87	48,40	49,00	49,23	46,43	50,46	50,40	50,05	50,84	53,09	54,32	51,37	50,60	51,16	48,16	49,60	48,19	46,51	45,93	45,58	45,81	46,20	46,29	48,93
TiO ₂	2,64	2,43	1,77	2,20	3,40	1,95	1,09	1,77	0,61	0,07	0,28	0,58	0,52	0,56	1,01	0,99	1,00	1,98	1,53	1,52	1,03	1,25	0,69	1,34
Al ₂ O ₃	3,46	3,63	1,96	2,19	4,45	2,05	1,87	1,91	1,57	1,30	1,10	1,03	1,61	1,51	1,21	1,10	1,33	1,80	1,10	1,49	1,81	1,04	1,16	1,81
Cr ₂ O ₃	0,48	0,41	0,38	0,35	0,30	0,77	0,52	0,05	0,53	0,51	0,59	0,21	0,42	0,51	0,00	0,28	0,28	0,09	0,17	0,00	0,00	0,07	0,18	0,31
FeO	15,99	14,54	18,94	15,87	16,70	13,69	18,79	18,86	21,72	16,22	13,68	23,95	23,53	21,53	32,58	26,11	28,68	28,95	36,98	35,80	37,99	37,54	39,22	24,25
MnO	0,24	0,35	0,22	0,30	0,16	0,17	0,33	0,41	0,44	0,45	0,13	0,03	0,33	0,47	0,68	0,40	0,36	0,73	0,73	0,73	0,59	0,37	0,47	0,40
MgO	12,05	14,84	12,21	13,91	12,21	18,02	15,90	16,14	16,47	21,23	26,19	18,08	16,39	17,59	9,25	12,66	7,73	5,20	2,54	1,31	2,65	2,58	2,27	12,06
CaO	17,28	15,40	15,52	15,95	16,35	12,89	11,10	10,80	7,82	7,11	3,71	4,75	6,60	6,67	7,11	8,85	12,42	14,74	11,02	13,57	10,13	10,95	9,73	10,89
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Si ⁴⁺	0,937	0,934	0,956	0,950	0,915	0,955	0,968	0,960	0,979	0,989	0,988	0,982	0,977	0,980	0,974	0,976	0,974	0,954	0,968	0,963	0,967	0,972	0,979	0,965
Ti ⁴⁺	0,039	0,035	0,026	0,032	0,050	0,028	0,016	0,026	0,009	0,001	0,004	0,008	0,008	0,008	0,015	0,015	0,015	0,031	0,024	0,024	0,016	0,020	0,011	0,020
Al ^{IV}	0,024	0,030	0,018	0,018	0,035	0,017	0,016	0,015	0,013	0,010	0,008	0,009	0,015	0,012	0,010	0,009	0,011	0,015	0,008	0,013	0,016	0,008	0,010	0,015
Al ^{VI}	0,016	0,011	0,005	0,007	0,017	0,005	0,005	0,007	0,005	0,005	0,003	0,002	0,003	0,005	0,004	0,003	0,005	0,007	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005	0,006
Cr ³⁺	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	0,006	0,004	0,000	0,004	0,004	0,004	0,002	0,003	0,004	0,000	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002
Fe ²⁺	0,262	0,235	0,309	0,256	0,275	0,217	0,302	0,302	0,350	0,253	0,208	0,383	0,380	0,345	0,551	0,430	0,485	0,497	0,652	0,632	0,671	0,660	0,694	0,406
Mn ²⁺	0,004	0,006	0,004	0,005	0,003	0,003	0,005	0,007	0,007	0,007	0,002	0,000	0,005	0,008	0,012	0,007	0,006	0,013	0,013	0,013	0,010	0,007	0,008	0,007
Mg ²⁺	0,352	0,427	0,355	0,400	0,359	0,508	0,455	0,462	0,473	0,590	0,710	0,515	0,472	0,502	0,279	0,371	0,233	0,159	0,080	0,041	0,083	0,081	0,072	0,347
Ca ²⁺	0,363	0,318	0,325	0,330	0,345	0,261	0,228	0,222	0,161	0,142	0,072	0,097	0,136	0,137	0,154	0,187	0,269	0,324	0,249	0,307	0,229	0,247	0,220	0,231
Ca/Ca+Mg	0,507	0,427	0,477	0,452	0,490	0,339	0,334	0,325	0,254	0,194	0,092	0,159	0,224	0,214	0,356	0,334	0,536	0,671	0,757	0,882	0,733	0,753	0,755	0,446
Fs	26,82	23,94	31,25	25,96	28,10	21,96	30,63	30,68	35,55	25,68	21,00	38,46	38,44	35,05	55,99	43,50	49,13	50,70	66,48	64,47	68,22	66,84	70,38	41,27
En	36,05	43,57	35,92	40,59	36,64	51,55	46,20	46,81	48,06	59,90	71,70	51,77	47,75	51,04	28,35	37,61	23,60	16,24	8,14	4,20	8,48	8,18	7,26	35,20
Wo	37,14	32,49	32,82	33,44	35,25	26,49	23,17	22,51	16,39	14,42	7,30	9,77	13,81	13,91	15,65	18,90	27,27	33,07	25,38	31,32	23,30	24,98	22,36	23,53
Вид, подвид				Авгит			Субкальциевый авгит			Магнез. пижонит		Промежуточ. пижонит			Субкальциевый Ферроавгит		Ферроавгит		Геденбергит		Пироксферроит			

Табл. 2. Химический состав пироксенов (мас.%) лунного реголита, формульные коэффициенты и минералы. Станция Луна-16. Анализы пироксенов выполнены на приборе JEOL JXA-8200, аналитик – А.А. Вирюс.

Сравнение минерального состава и текстур метаморфизованных земных толеитовых базальтов с лунными морскими и континентальными породами выявило существенную разницу в облике и наборе пород, составе минеральных фаз. В изоморфных рядах и минеральных сериях преобладают кальциевые и железистые разновидности. Так, среди пироксенов – *ферроавгит*, *субкальциевый ферроавгит*, *геденбергит*, *промежуточный пижонит*, а среди оливинов – *гортонит* и *фаялит* (рис. 4, 5; табл. 2, 3), т.е. их железистые разновидности, а среди плагиоклазов – высококальциевый анортит.

Клинопироксены. Пироксены из земных базальтов всегда переменного состава, как правило, зональные со сменой состава от центра зерен к периферии, так *субкальциевый авгит* замещается *авгитом* и *ферроавгитом* (Макеев, Брянчанинова, 2007), то есть от кальций-магневых к железистым разновидностям клинопироксенов (рис. 4d). В лунных базальтах зональность выражена не столь ярко, однако в отдельной частице реголита небольшого размера 300–500 мкм, как правило, встречается несколько фаз пироксенов разного состава, а также часто наблюдаются (рис. 3 5–6) структуры жидкостной несмесимости оливин-пироксенового расплава (Хисина, 1987).

Установленный факт интерпретируется нами как существенная разница во времени кристаллизации базальтовой магмы: на Земле – длительное время остывания магмы и кристаллизации минералов со сменой их химизма в отдельных зернах, а на Луне – очень быстрая кристаллизация с фиксированным составом минеральных фаз (Khisina, Makarov, 1977). Лунные пироксены из базальтов отличаются от земных существенно большей железистостью и разнообразием состава разновидностей. В лунном реголите встречены три минеральных вида клинопироксена – *авгит*, *пижонит* и *клиноэнстатит*, а также пироксеноид *пироксферроит* и один вид ортопироксена – *бронзит*, а также 8 химических разновидностей пироксенов (табл. 2, рис. 4): *ферроавгит*, *субкальциевый авгит*, *субкальциевый ферроавгит*, *магнезиальный пижонит*, *промежуточный пижонит*, *железистый пижонит*, *геденбергит*, *ферросалит*, а в земных породах (Богатилов, 1979; Криволуцкая, Брянчанинова, 2011; Магматизм..., 1990; Макеев, Брянчанинова, 1999; 2007; Макеев и др., 2020) распространены те же минералы – *авгит* и *пижонит*, но значительно меньше разновидностей – *ферроавгит*, *субкальциевый авгит*, *магнезиальный пижонит*, *промежуточный пижонит*. Хром (0,05–0,87 мас.% Cr₂O₃) и титан (0,06–1,37 мас.% TiO₂) являются существенной изоморфной примесью в

Станция Луна-20

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Сред.			
SiO ₂	45,86	49,97	49,52	49,39	48,81	50,14	49,33	47,35	48,60	54,88	50,26	51,76	51,34	50,60	46,38	50,10	49,77	48,69	48,24	48,52	49,26	47,62	41,18	49,02			
TiO ₂	0,76	0,35	0,55	0,47	0,82	0,33	0,56	0,53	0,63	0,00	0,52	0,39	0,12	0,48	0,07	0,06	0,33	1,37	0,53	0,92	1,06	1,12	3,90	0,69			
Al ₂ O ₃	10,47	2,35	1,24	1,38	2,01	0,59	1,12	3,82	1,85	1,09	2,05	1,07	3,00	1,50	9,08	2,67	1,10	1,27	1,64	1,55	1,45	0,81	4,47	2,50			
Cr ₂ O ₃	0,77	0,39	0,41	0,10	0,15	0,22	0,17	0,38	0,33	0,77	0,79	0,53	0,34	0,46	0,06	0,22	0,00	0,43	0,16	0,50	0,26	0,15	0,16	0,34			
FeO	16,69	20,81	25,88	28,19	27,86	28,16	28,89	29,54	28,42	13,86	20,29	19,58	17,55	21,45	23,57	27,48	30,00	24,76	28,87	27,14	23,11	30,40	39,43	25,30			
MnO	0,13	0,25	0,34	0,30	0,35	0,44	0,76	0,40	0,31	0,15	0,26	0,51	0,25	0,37	0,33	0,36	0,50	0,18	0,41	0,48	0,53	0,36	0,39	0,36			
MgO	13,46	12,27	10,80	10,99	11,26	11,82	11,18	9,61	9,85	27,97	14,49	17,45	17,97	14,34	17,38	16,00	12,07	9,58	6,93	9,26	10,61	4,62	0,00	12,17			
CaO	11,87	13,61	11,25	9,17	8,75	8,30	7,99	8,36	10,00	1,29	11,33	8,71	9,43	10,80	3,14	3,11	6,22	13,72	13,22	11,62	13,72	14,92	10,48	9,61			
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			
Si ⁴⁺	0,920	0,977	0,981	0,981	0,972	0,990	0,982	0,962	0,975	0,992	0,975	0,985	0,977	0,980	0,918	0,980	0,987	0,969	0,978	0,973	0,973	0,976	0,902	0,970			
Ti ⁴⁺	0,011	0,005	0,008	0,007	0,012	0,005	0,008	0,008	0,010	0,000	0,008	0,006	0,002	0,007	0,001	0,001	0,005	0,021	0,008	0,014	0,016	0,017	0,064	0,011			
Al ^{IV}	0,069	0,017	0,010	0,011	0,016	0,005	0,010	0,030	0,016	0,008	0,017	0,009	0,022	0,013	0,081	0,019	0,008	0,010	0,014	0,013	0,012	0,007	0,034	0,020			
Al ^{VI}	0,055	0,010	0,004	0,005	0,008	0,002	0,003	0,015	0,006	0,004	0,006	0,003	0,012	0,005	0,025	0,011	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005	0,003	0,024	0,010			
Cr ³⁺	0,006	0,003	0,003	0,000	0,001	0,002	0,001	0,003	0,003	0,006	0,006	0,004	0,003	0,004	0,000	0,002	0,000	0,003	0,001	0,004	0,002	0,001	0,001	0,003			
Fe ²⁺	0,280	0,340	0,429	0,468	0,464	0,465	0,481	0,502	0,477	0,209	0,329	0,312	0,279	0,347	0,390	0,449	0,498	0,412	0,489	0,455	0,382	0,521	0,722	0,422			
Mn ²⁺	0,002	0,004	0,006	0,005	0,006	0,007	0,013	0,007	0,005	0,002	0,004	0,008	0,004	0,006	0,006	0,006	0,008	0,003	0,007	0,008	0,009	0,006	0,007	0,006			
Mg ²⁺	0,402	0,358	0,319	0,326	0,334	0,348	0,332	0,291	0,295	0,754	0,419	0,495	0,510	0,414	0,513	0,467	0,357	0,284	0,209	0,277	0,312	0,141	0,000	0,355			
Ca ²⁺	0,255	0,285	0,239	0,195	0,187	0,176	0,170	0,182	0,215	0,025	0,236	0,178	0,192	0,224	0,066	0,065	0,132	0,293	0,287	0,250	0,290	0,328	0,246	0,205			
Ca/Ca+Mg	0,388	0,444	0,428	0,375	0,358	0,335	0,339	0,385	0,422	0,032	0,360	0,264	0,274	0,351	0,115	0,123	0,270	0,507	0,578	0,474	0,482	0,699	1,000	0,391			
Fs	29,86	34,60	43,46	47,34	47,11	47,04	48,92	51,48	48,33	21,20	33,46	31,66	28,46	35,24	40,24	45,80	50,42	41,68	49,64	46,36	38,78	52,64	74,60	42,97			
En	42,92	36,39	32,34	32,92	33,95	35,20	33,75	29,85	29,87	76,28	42,59	50,29	51,94	42,02	52,90	47,56	36,17	28,73	21,24	28,21	31,73	14,25	0,00	36,14			
Wo	27,22	29,01	24,20	19,74	18,95	17,76	17,34	18,67	21,80	2,52	23,95	18,05	19,60	22,73	6,86	6,65	13,40	29,59	29,11	25,43	29,50	33,11	25,40	20,89			
Вид, подвид	Авгит								Магнезиальный титанит								Промежуточный титанит								Ферроагит		Геденбергит

Табл. 2. Продолжение

лунных пироксенах, это потенциальные ресурсы из которых при перекристаллизации могут образоваться рудные ильменитовые и хромитовые скопления, так же как это происходит в земных альпинотипных ультрабазитах (Макеев, Брянчанинова, 1999).

Оливин. В лунных породах оливиновых базальтах, габбро и верлитах оливин один из главных породообразующих минералов. Его особенностью является аномально высокая железистость. Он представлен *гортонолитом* и *фаялитом* (табл. 3, рис. 5). Среди изоморфных примесей в оливинах обычными являются марганец, и в лунных та же закономерность (0,10–0,95 мас. % MnO), что и в земных, никель в лунных оливинах оказался на пороге обнаружения, а вот содержание кальция значительно выше (0,08–2,87 мас. % CaO), причем в морских базальтах больше по сравнению с континентальными областями и значительно больше, чем в земных (Макеев, Брянчанинова, 1999). В работе «Магматизм Земли и Луны» (1990) обсуждается вопрос об изоморфном вхождении в лунные оливины хрома, установленного в количестве (0,03–0,32 мас. % Cr₂O₃). В земных оливинах ультрабазитов и базитов хром отсутствует, хотя в литературе известны упоминания о редких таких случаях (Магматизм Земли и Луны, 1990).

Плагиноклаз. Лунные пироксены в морских базальтах и габбро ассоциируют с высококальциевым плагиноклазом анортитом – An_{0,90–1,00} или очень редко с битовнитом – An_{0,80–0,90} (табл. 4, рис. 6), превалирует анортит. В земных базальтах чаще присутствует основной плагиноклаз лабрадор-битовнит, и очень редко андезин. Особенность лунных плагиноклазов – это низкое содержание натрия (0,07–3,12 мас. % Na₂O) и аномально высокое содержание железа (0,01–2,26 мас. % FeO), которое можно объяснить только невидимыми включениями других железистых минералов. При величине обломков породы 100–500 мкм, размеры весьма совершенных пластинчатых кристаллов плагиноклаза по ширине нередко составляют 3–50 мкм, по удлинению – 10–300 мкм.

Главные акцессорные рудные минералы земных базальтов и основных магматических пород (специализированных на титано-железные руды) – титаномагнетит, ильменит, пирит и халькопирит, а в лунных – ильменит, ульвошпинель, *субальмотитанохромит*, троилит и самородное железо.

Ильменит. Мелкие выделения ильменита широко распространены в базальтах

Станция Луна-24		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Сред.
Оксиды																									
SiO ₂		51,14	50,89	49,99	51,20	51,55	51,07	48,22	49,91	50,70	49,57	48,35	48,23	48,05	49,31	49,31	48,75	48,60	47,35	47,17	46,86	47,30	47,18	53,51	49,31
TiO ₂		0,68	0,77	1,02	0,45	0,51	0,72	0,32	0,53	0,65	1,05	0,80	0,89	0,83	1,19	0,86	0,80	0,69	0,75	0,98	0,78	0,92	0,90	0,67	0,77
Al ₂ O ₃		1,56	1,64	1,58	1,98	1,80	1,82	1,95	2,27	1,44	1,26	0,81	0,97	1,09	2,76	0,98	1,00	1,06	0,83	0,94	0,86	1,29	0,79	0,82	1,37
Cr ₂ O ₃		0,59	0,45	0,43	0,86	0,87	0,71	0,50	0,73	0,57	0,20	0,00	0,11	0,18	0,59	0,16	0,21	0,18	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,33
FeO		14,7	15,5	17,8	12,3	14,6	14,0	13,4	18,5	16,2	24,8	29,9	28,5	29,3	22,1	27,7	29,9	27,9	33,8	31,1	37,9	32,6	33,7	16,7	23,61
MnO		0,22	0,21	0,21	0,20	0,18	0,22	0,19	0,27	0,24	0,25	0,29	0,26	0,33	0,28	0,22	0,33	0,24	0,39	0,19	0,36	0,26	0,27	0,24	0,25
MgO		14,0	13,2	11,4	15,2	16,3	15,3	13,1	13,2	14,0	10,8	6,5	5,5	6,6	11,9	7,7	6,2	7,9	3,7	1,1	2,2	2,5	2,3	25,0	9,81
CaO		16,2	16,1	16,3	16,3	13,5	15,5	14,8	14,0	15,6	11,7	13,3	15,5	13,6	12,7	12,3	12,7	11,9	13,0	18,3	11,0	15,2	14,9	2,3	13,77
Сумма		99,13	98,81	98,71	98,53	99,32	99,27	92,51	99,42	99,31	99,61	100,0	100,0	100,0	100,8	99,17	99,93	98,57	99,97	99,76	99,92	99,94	100,00	99,52	99,23
Si ⁴⁺		0,988	0,991	0,986	0,988	0,987	0,980	0,999	0,975	0,980	0,984	0,980	0,980	0,974	0,965	1,001	0,993	0,992	0,981	0,984	0,987	0,984	0,982	0,986	0,985
Ti ⁴⁺		0,010	0,011	0,015	0,006	0,007	0,010	0,005	0,008	0,009	0,016	0,012	0,014	0,013	0,018	0,013	0,012	0,011	0,012	0,015	0,012	0,014	0,014	0,009	0,012
Al ^{IV}		0,003	0,000	0,000	0,006	0,005	0,009	0,000	0,017	0,011	0,000	0,008	0,006	0,013	0,017	0,000	0,000	0,000	0,008	0,001	0,001	0,001	0,004	0,005	0,005
Al ^{VI}		0,015	0,021	0,020	0,017	0,015	0,011	0,027	0,009	0,006	0,014	0,002	0,005	0,000	0,015	0,026	0,017	0,015	0,003	0,011	0,010	0,015	0,006	0,004	0,012
Cr ³⁺		0,004	0,003	0,003	0,007	0,007	0,005	0,004	0,006	0,004	0,002	0,000	0,001	0,001	0,005	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,003
Fe ²⁺		0,238	0,253	0,294	0,199	0,235	0,224	0,232	0,302	0,261	0,412	0,507	0,484	0,497	0,362	0,469	0,510	0,477	0,585	0,542	0,667	0,567	0,587	0,258	0,398
Mn ²⁺		0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,006	0,005	0,004	0,006	0,004	0,007	0,003	0,006	0,005	0,005	0,004	0,004
Mg ²⁺		0,404	0,384	0,334	0,438	0,464	0,437	0,404	0,385	0,402	0,320	0,197	0,168	0,200	0,347	0,233	0,188	0,242	0,116	0,035	0,069	0,076	0,072	0,688	0,287
Ca ²⁺		0,335	0,335	0,345	0,337	0,277	0,319	0,329	0,293	0,323	0,248	0,289	0,338	0,295	0,267	0,268	0,277	0,261	0,289	0,408	0,248	0,338	0,331	0,045	0,295
Ca/Ca+Mg		0,453	0,466	0,508	0,435	0,374	0,422	0,449	0,432	0,445	0,437	0,595	0,668	0,596	0,435	0,535	0,595	0,519	0,714	0,920	0,784	0,816	0,822	0,061	0,543
Fs		24,4	26,0	30,2	20,4	24,0	22,9	24,1	30,8	26,5	42,0	51,1	48,9	50,0	37,1	48,4	52,3	48,7	59,1	55,0	67,8	57,8	59,3	26,0	40,6
En		41,4	39,5	34,3	45,0	47,6	44,6	41,8	39,3	40,8	32,7	19,8	17,0	20,2	35,6	24,0	19,3	24,7	11,7	3,6	7,0	7,8	7,2	69,5	29,3
Wo		34,3	34,5	35,5	34,6	28,4	32,5	34,1	29,9	32,7	25,3	29,1	34,1	29,8	27,4	27,6	28,4	26,7	29,2	41,4	25,2	34,4	33,5	4,5	30,1
Вид, повид							Авгит							Ферроавгит						Геденбергит					Клино-энстатит

Табл. 2. Продолжение

лунных морей (Луна-16, -24). Химический состав изученных зерен представлен в табл. 5.

Средние составы ильменита из реголита двух станций довольно близки и заметно не отличаются от земных, наблюдаются те же обычные изоморфные примеси: Mn, V, Cr. В ильменитах реголита станции Луна-24 заметно чаще присутствует небольшая примесь магния. В будущем при нахождении на Луне крупных скоплений ильменитовых руд они с успехом могут быть использованы в промышленных масштабах для производства металлического железа и рутилового шлака по известной расплавной методике.

Хромшпинелиды. Среди хромшпинелидов (табл. 6, рис. 7) в лунном реголите преобладают высокожелезистые и высокотитанистые *субтитаноалюмохромиты*, такие разновидности на Земле встречаются в древних архейских и протерозойских расслоенных ультрабазитовых массивах, специализированных на хромовые руды и платиноиды. Размеры выделений хромшпинелидов варьируют от 2–10 мкм (розовая шпинель) до 20–130 мкм – субтитаноалюмохромшпинелиды (рис. 2 3, 8; рис. 3 2). Особенностью лунных минералов является отсутствие окисной (трехвалентной) формы железа, что доказывается ЯГР (мёссбауэровской) спектроскопией (Малышева, 1980; Makeyev et al., 2006; Макеев, 2013).

Исследователи лунных шпинелей и хромшпинелидов испытывают трудности при отображении состава лунных фаз на диаграммах (Малышева, 1980; Хаггерти, 1979; Фрондел, 1978; Prissel et al., 2014), поскольку в этих фазах наблюдается явный дефицит ионов в октаэдрических позициях. До сих пор не разработана единая типизация лунных хромшпинелидов. Известен факт обращенности земных хромшпинелидов, при этом двухвалентное железо может находиться как в октаэдрах, так и в тетраэдрах. Вероятно это же происходит и в лунных шпинелях. Предлагается использовать расчеты кристаллохимических коэффициентов лунных хромшпинелидов так же, как земных (Макеев, Брянчанинова, 1999; Макеев, 2013), отображая результаты (табл. 6) на треугольной призме (рис. 7), заменяя трехвалентное железо на «обращенное» двухвалентное (в октаэдрах). Поле разрыва смесимости между октаэдрическими ионами алюминия и титаном (+ Fe²⁺_{обращ.}) в лунных шпинелидах значительно уже, чем в земных фазах (рис. 7). При нахождении на Луне крупных скоплений хромовых

Станция Луна-24

Оксиды	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	Сред.		
SiO ₂	50,15	50,53	51,40	50,63	51,52	51,35	49,95	49,20	48,35	48,54	47,49	47,59	48,10	47,56	49,95	49,30	50,98	49,51	49,80	51,78	53,11	53,11	52,99	50,12		
TiO ₂	0,36	0,31	0,26	0,30	0,27	0,32	0,43	0,76	0,60	0,59	0,87	0,73	0,86	0,83	0,40	0,41	0,51	0,87	0,78	0,53	0,12	0,32	0,12	0,50		
Al ₂ O ₃	1,68	1,12	1,40	1,27	1,86	1,28	1,19	0,82	0,83	0,93	1,00	0,79	0,82	0,78	0,91	0,61	0,97	1,21	0,91	1,10	1,10	1,20	1,27	1,09		
Cr ₂ O ₃	0,75	0,50	0,59	0,55	0,83	0,52	0,39	0,12	0,15	0,14	0,00	0,00	0,16	0,00	0,24	0,20	0,29	0,22	0,23	0,51	0,66	0,74	0,63	0,37		
FeO	20,39	24,63	20,24	24,93	17,69	22,41	26,48	30,52	34,38	31,03	36,00	35,83	32,36	35,54	27,83	32,80	23,99	29,92	27,47	21,07	17,27	12,72	17,34	26,21		
MnO	0,25	0,29	0,30	0,30	0,24	0,32	0,31	0,37	0,40	0,44	0,33	0,36	0,38	0,39	0,34	0,35	0,34	0,33	0,34	0,28	0,24	0,16	0,21	0,32		
MgO	14,78	14,56	17,28	14,38	16,81	15,34	12,19	9,04	7,00	7,01	4,08	4,74	7,12	4,07	11,64	10,59	16,12	12,51	13,47	19,13	22,59	23,75	22,52	13,07		
CaO	10,85	8,05	8,54	7,51	10,28	8,77	8,30	8,44	8,55	10,62	10,68	9,88	9,75	10,84	8,45	5,58	6,31	5,26	7,00	5,35	4,49	6,54	4,94	8,04		
Сумма	99,22	100,0	100,0	99,88	99,49	100,3	99,23	99,27	100,3	99,30	100,5	99,92	99,54	100,0	99,76	99,83	99,51	99,81	100,0	99,75	99,58	98,53	100,0	99,72		
Si ⁴⁺	0,977	0,983	0,982	0,989	0,989	0,989	0,993	0,997	0,986	0,993	0,983	0,986	0,984	0,987	0,991	0,991	0,988	0,985	0,978	0,985	0,990	0,988	0,985	0,987		
Ti ⁴⁺	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006	0,012	0,009	0,009	0,014	0,011	0,013	0,013	0,006	0,006	0,007	0,013	0,012	0,008	0,002	0,004	0,002	0,008		
Al ^{IV}	0,017	0,012	0,015	0,007	0,007	0,006	0,001	0,000	0,004	0,000	0,004	0,003	0,003	0,000	0,003	0,003	0,004	0,002	0,011	0,007	0,008	0,008	0,013	0,006		
Al ^{VI}	0,002	0,000	0,001	0,008	0,014	0,008	0,013	0,019	0,006	0,014	0,008	0,007	0,007	0,010	0,007	0,004	0,007	0,012	0,000	0,005	0,004	0,005	0,000	0,007		
Cr ³⁺	0,006	0,004	0,004	0,004	0,006	0,004	0,003	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004	0,005	0,005	0,005	0,003		
Fe ²⁺	0,332	0,401	0,323	0,407	0,284	0,361	0,440	0,517	0,586	0,531	0,623	0,621	0,554	0,617	0,461	0,551	0,389	0,498	0,451	0,335	0,269	0,198	0,269	0,436		
Mn ²⁺	0,004	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008	0,006	0,006	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,004	0,004	0,002	0,003	0,005		
Mg ²⁺	0,429	0,422	0,492	0,419	0,481	0,440	0,361	0,273	0,213	0,214	0,126	0,146	0,217	0,126	0,344	0,317	0,466	0,371	0,394	0,543	0,628	0,658	0,624	0,379		
Ca ²⁺	0,226	0,168	0,175	0,157	0,211	0,181	0,177	0,183	0,187	0,233	0,237	0,219	0,214	0,241	0,180	0,120	0,131	0,112	0,147	0,109	0,090	0,130	0,098	0,171		
Ca/Ca+Mg	0,345	0,284	0,262	0,273	0,305	0,291	0,329	0,402	0,467	0,521	0,653	0,600	0,496	0,657	0,343	0,275	0,220	0,232	0,272	0,167	0,125	0,165	0,136	0,340		
Fs	33,6	40,4	32,7	41,4	29,1	36,7	45,0	53,1	59,5	54,3	63,2	62,9	56,2	62,7	46,8	55,8	39,5	50,7	45,4	34,0	27,3	20,1	27,2	44,2		
En	43,5	42,6	49,7	42,6	49,3	44,8	36,9	28,0	21,6	21,9	12,8	14,8	22,1	12,8	34,9	32,1	47,3	37,8	39,7	55,0	63,6	66,7	62,9	38,4		
Wo	22,9	16,9	17,6	16,0	21,6	18,4	18,1	18,8	18,9	23,8	24,0	22,2	21,7	24,5	18,2	12,2	13,3	11,4	14,8	11,1	9,1	13,2	9,9	17,3		
Вид, повид	Субкальциевый авгит															Промежуточный титсонит										Магнезиальный титсонит

Табл. 2. Продолжение

руд особого состава (*субтитаноалюмохромитов*), они с успехом могут быть использованы в промышленных масштабах в металлургическом переделе для производства феррохрома.

В отличие от земного минерального мира на Луне не обнаружено гидроксильных, водосодержащих минералов, кроме единичных находок водосодержащих стекол (Saal et al., 2008) и возможно дегидрогенизации оливина (Khisina et al., 2013). Возможно, что они в процессе длительной дегазации и отсутствия атмосферы на Луне разложились или скорее вовсе не образовывались.

Геохимические особенности лунного реголита. Известно, что наиболее распространенные элементы в вещественном составе горных пород и минералов Луны – это кремний, кислород, алюминий, железо, кальций, магний, титан, натрий; очень мало хрома, марганца, никеля, калия, серы, фосфора; почти полностью отсутствуют летучие, углерод, хлор. Остальные элементы присутствуют только в микроколичествах.

Обсуждение результатов. Так как в выборе объектов исследования – частиц лунного реголита – присутствует элемент случайности, то даже ограниченное количество анализов можно использовать в статистических обобщениях для сравнения региональных особенностей реголита в разных участках посадки автоматических лунных станций (Луна-16, -20, -24). Сравнивая распространенность лунных минералов (табл. 1) и типохимические особенности породообразующих и аксессуарных минералов (табл. 2–6, рис. 4–7), следует отметить следующее.

– Железистость породообразующего клинопироксена значительно выше в морских оливиновых базальтах (табл. 2, рис. 4), в них наибольшим распространением пользуются *геденберgit* и пироксферроит, ортопироксен – *бронзит*, наоборот, присутствует только среди континентальных пород, происходя, вероятно, из норитов, габброноритов, лерцолитов.

– Железистость лунного оливина варьирует в очень широких пределах – от форстерита с Fe от 11,5 мол. % до фаялита с Fe 95,0 мол. % (табл. 3, рис. 5), именно такой разнообразный оливин в континентальной части Луны. В море Изобилия оливин наименее железистый (вероятно из оливинового базальта), а в море Кризисов наоборот наиболее железистый. Можно предположить, что оливин попадает в реголит из нескольких типов пород, о чем свидетельствует его бимодальное распределение.

– Основность плагиоклаза также широко варьирует от анортита с 0,4 мол. % Ab до битовнита с 18,5 мол. % Ab (табл. 4, рис. 6), распределение также бимодальное. Реголит всех станций содержит наиболее основной плагиоклаз, присущий на Земле породе анортозиту. Плагиоклаз из моря Изобилия представлен как анортитом, так и битовнитом, последний встречается в лунных породах – оливиновом базальте и габбро.

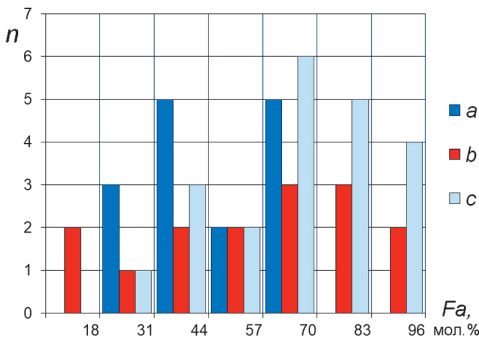


Рис. 5. Гистограмма распределения значений фаялитовой составляющей в оливине (Fa, мол.%) из лунного реголита. Средние значения и дисперсия (Fa, мол.%): а – Луна-16 – 40,8±10,1 (n=13); б – Луна-20 – 54,6±25,3 (n=15); с – Луна-24 – 65,9±19,7 (n=21).

Станция Луна-16

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	37,38	33,57	36,29	35,33	35,55	37,65	37,43	36,48	34,67	36,44	35,08	37,97	34,24
FeO	27,66	47,75	33,22	38,46	37,41	26,11	27,40	32,56	42,07	32,80	39,19	24,32	43,69
MnO	0,30	0,69	0,45	0,38	0,43	0,42	0,26	0,30	0,44	0,46	0,63	0,10	0,47
MgO	34,01	17,51	29,21	25,08	26,07	35,12	34,19	30,12	22,28	30,00	23,73	36,31	20,02
CaO	0,42	0,48	0,56	0,62	0,54	0,69	0,66	0,45	0,53	0,30	1,36	1,30	1,58
Сумма	99,78	100,0	99,73	99,88	100,0	100,0	99,94	99,91	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Fe ²⁺	0,309	0,595	0,383	0,455	0,440	0,290	0,306	0,373	0,507	0,376	0,467	0,268	0,534
Mn ²⁺	0,003	0,009	0,005	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,005	0,005	0,008	0,001	0,006
Mg ²⁺	0,678	0,389	0,600	0,529	0,547	0,695	0,681	0,615	0,479	0,614	0,504	0,713	0,436
Ca ²⁺	0,006	0,008	0,008	0,009	0,008	0,010	0,009	0,007	0,008	0,004	0,021	0,018	0,025

Станция Луна-20

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	29,86	30,30	35,51	34,91	37,36	32,15	32,24	32,95	33,24	32,16	37,88	34,72	32,89	40,16	40,64
FeO	67,35	64,69	37,25	39,57	28,08	55,49	55,04	51,10	49,69	55,72	25,47	41,90	51,71	13,15	10,81
MnO	0,67	0,95	0,10	0,21	0,38	0,58	0,77	0,57	0,48	0,50	0,09	0,58	0,50	0,10	0,19
MgO	1,32	3,21	25,46	22,44	34,10	11,44	11,85	14,83	16,08	11,54	36,29	22,64	14,66	46,23	48,28
CaO	0,80	0,73	1,64	2,87	0,08	0,29	0,10	0,55	0,41	0,08	0,26	0,16	0,24	0,18	0,09
Сумма	100,0	99,88	99,96	100,0	100,0	99,95	100,0	100,0	99,91	100,0	100,0	100,0	100,0	99,93	100,0
Fe ²⁺	0,943	0,893	0,439	0,474	0,314	0,722	0,714	0,648	0,625	0,725	0,281	0,505	0,657	0,137	0,111
Mn ²⁺	0,010	0,013	0,001	0,003	0,004	0,008	0,010	0,007	0,006	0,007	0,001	0,007	0,006	0,001	0,002
Mg ²⁺	0,033	0,079	0,535	0,479	0,680	0,265	0,275	0,335	0,361	0,268	0,714	0,486	0,332	0,857	0,886
Ca ²⁺	0,014	0,013	0,025	0,044	0,001	0,005	0,001	0,009	0,007	0,001	0,004	0,002	0,004	0,002	0,001

Станция Луна-24

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
SiO ₂	30,79	30,37	32,02	31,19	31,25	32,14	32,03	33,03	36,36	33,79	36,85	34,97	35,41	33,08	32,97	32,81	31,84	34,59	36,99	32,50	38,15
FeO	67,53	66,76	65,22	63,97	61,65	59,05	59,23	50,10	33,56	48,06	32,97	44,62	50,64	52,69	52,40	55,47	54,09	45,89	32,13	46,34	22,02
MnO	0,56	0,61	0,52	0,55	0,49	0,44	0,47	0,35	0,25	0,34	0,29	0,33	0,54	0,45	0,41	0,45	0,37	0,32	0,23	0,33	0,24
MgO	0,95	2,02	1,95	4,62	6,58	8,89	8,88	15,11	30,11	18,55	28,25	18,19	11,08	14,16	13,66	11,98	11,78	20,14	31,55	14,84	39,27
CaO	0,53	0,83	1,87	0,63	0,55	0,33	0,33	0,33	0,25	0,36	1,24	1,05	2,02	0,45	0,38	0,22	0,54	0,36	0,24	0,36	0,25
Сумма	100,4	100,6	101,6	101,0	100,5	100,8	100,9	98,93	100,5	101,1	99,60	99,16	99,68	100,8	99,82	100,9	98,61	101,3	101,1	94,37	99,92
Fe ²⁺	0,957	0,927	0,910	0,869	0,828	0,779	0,780	0,644	0,378	0,589	0,388	0,566	0,685	0,664	0,674	0,715	0,709	0,556	0,361	0,629	0,238
Mn ²⁺	0,008	0,009	0,007	0,008	0,007	0,006	0,006	0,005	0,003	0,004	0,003	0,004	0,007	0,006	0,005	0,006	0,005	0,004	0,003	0,004	0,003
Mg ²⁺	0,025	0,050	0,049	0,112	0,156	0,209	0,208	0,346	0,616	0,401	0,590	0,413	0,274	0,323	0,314	0,275	0,277	0,434	0,633	0,361	0,756
Ca ²⁺	0,010	0,015	0,033	0,011	0,009	0,006	0,006	0,005	0,004	0,006	0,018	0,017	0,034	0,007	0,006	0,004	0,009	0,006	0,004	0,006	0,003

Табл. 3. Химический состав оливины (мас.%) лунного реголита и формульные коэффициенты. Анализы оливины выполнены на приборе JEOL JXA-8200, аналитик – А.А. Вирюс.

Станция Луна-16

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
SiO ₂	47,13	45,88	46,56	47,07	49,01	47,85	46,20	42,40	47,92	43,50	45,76	41,41	44,73	47,19	44,09	45,28	43,76	43,15	43,76	45,22	44,78
Al ₂ O ₃	32,80	33,28	32,52	33,52	32,26	31,42	33,96	36,95	33,12	36,89	33,41	37,24	34,84	33,32	35,61	34,70	36,24	36,56	35,49	33,51	34,36
CaO	17,07	15,99	17,10	15,89	15,48	15,41	17,68	20,19	16,46	17,90	17,20	20,27	18,55	17,29	17,90	17,80	18,68	18,24	18,32	17,34	17,12
Na ₂ O	1,35	2,59	2,32	2,50	2,50	3,12	1,59	0,12	1,86	0,91	1,93	0,87	1,04	1,21	1,73	1,65	1,12	1,40	1,55	2,77	2,79
FeO	1,65	2,26	1,51	1,02	0,75	2,21	0,56	0,33	0,64	0,80	1,71	0,21	0,85	1,00	0,66	0,57	0,21	0,65	0,88	1,15	0,96
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>An</i>	91,8	84,5	86,7	84,9	84,6	81,4	90,8	99,3	88,7	94,6	88,8	95,4	94,0	92,7	90,1	90,5	93,7	92,0	91,3	84,7	84,5
<i>Ab</i>	8,2	15,5	13,3	15,1	15,4	18,6	9,2	0,7	11,3	5,4	11,2	4,6	6,0	7,3	9,9	9,5	6,3	8,0	8,7	15,3	15,5

Станция Луна-20

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	44,02	44,54	43,18	43,72	44,28	42,83	44,41	44,34	43,87	43,31	43,93	44,02	43,00	42,62	43,01	43,03	45,08
Al ₂ O ₃	34,96	34,74	35,23	35,74	34,80	37,51	34,68	34,84	35,14	36,37	35,37	35,05	36,12	35,30	36,90	36,44	34,07
CaO	19,07	20,51	20,05	19,15	19,49	18,75	19,34	19,21	19,31	19,68	19,17	19,16	18,75	19,44	18,62	18,65	17,85
Na ₂ O	1,08	0,20	0,07	0,92	0,87	0,90	1,02	1,09	0,86	0,39	0,98	1,02	0,98	0,33	1,07	1,05	2,35
FeO	0,87	0,01	0,72	0,46	0,56	0,01	0,55	0,52	0,82	0,26	0,55	0,75	1,16	0,81	0,40	0,83	0,65
Сумма	100,0	100,0	99,28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,51	100,0	100,0	100,0
<i>An</i>	94,0	98,9	99,6	94,8	95,2	94,8	94,4	94,0	95,2	97,8	94,5	94,3	94,4	98,1	93,9	94,0	87,0
<i>Ab</i>	6,0	1,1	0,4	5,2	4,8	5,2	5,6	6,0	4,8	2,2	5,5	5,7	5,6	1,9	6,1	6,0	13,0

Станция Луна-24

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	46,44	46,32	47,91	45,27	45,14	46,24	48,58	44,89	48,11	45,78	46,17	46,59	45,97	46,81	47,02
Al ₂ O ₃	33,02	32,91	32,47	34,12	34,38	33,52	32,13	34,28	31,89	33,25	33,44	32,45	33,01	32,64	30,71
CaO	18,61	18,74	17,41	19,07	18,89	18,73	17,10	19,43	17,63	19,02	18,34	19,18	19,54	19,07	17,78
Na ₂ O	0,67	0,71	1,51	0,59	0,65	0,88	1,66	0,37	1,30	0,55	0,88	0,67	0,58	0,94	0,98
FeO	1,08	1,11	0,66	0,89	0,88	0,52	0,53	0,93	1,07	1,00	1,17	0,83	0,90	0,54	3,08
Сумма	99,82	99,78	99,95	99,94	99,94	99,89	100,0	99,00	100,0	99,61	100,0	99,72	100,0	100,0	99,57
<i>An</i>	96,1	95,9	91,1	96,6	96,2	95,0	90,1	97,9	92,3	96,8	94,9	96,2	96,8	94,7	94,2
<i>Ab</i>	3,9	4,1	8,9	3,4	3,8	5,0	9,9	2,1	7,7	3,2	5,1	3,8	3,2	5,3	5,8

Табл. 4. Химический состав плагиоклаза (мас.%) лунного реголита и миналы. Анализы плагиоклазов выполнены на приборе JSM-5610LV, аналитик – Л.О. Магазина.

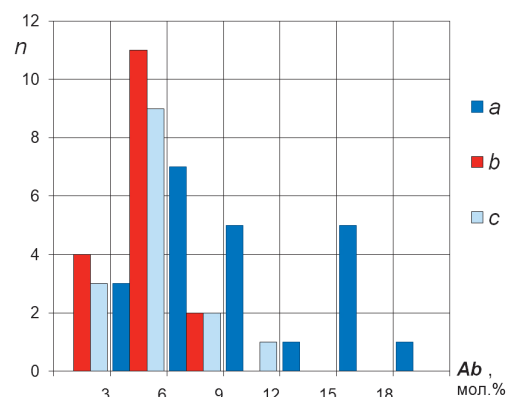


Рис. 6. Гистограмма распределения альбитовой составляющей плагиоклаза из лунного реголита. Средние значения и дисперсия (Ab, мол. %): a – Луна-16 – $10,3 \pm 4,1$ ($n=22$); b – Луна-20 – $4,7 \pm 2,0$ мол. % ($n=17$); c – Луна-24 – $5,0 \pm 2,2$ мол. % ($n=15$)

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TiO ₂	52,53	52,41	52,91	52,47	52,16	52,61	52,81	52,15	52,78	52,89	53,11
FeO	46,57	46,03	45,99	46,06	43,01	46,36	46,35	46,72	46,11	45,65	46,18
MgO	—	—	—	—	3,15	—	—	—	—	—	—
MnO	0,46	0,43	0,56	0,56	0,42	0,61	0,08	0,50	0,44	0,45	0,49
V ₂ O ₃	0,33	0,25	0,20	0,51	0,28	0,18	0,43	0,18	0,44	0,81	0,14
Cr ₂ O ₃	—	0,69	0,26	0,26	0,51	0,21	0,30	0,38	0,17	—	—
Сумма	99,89	99,80	99,92	99,86	99,54	99,96	99,98	99,94	99,94	99,80	99,92
Оксиды	12	13	14	15	15	17	18	19	20	21	Средн.
TiO ₂	52,67	52,97	52,74	52,47	51,72	52,93	52,42	51,2	52,49	52,37	52,51
FeO	46,34	46,45	46,78	46,49	46,74	45,99	46,41	47,48	46,13	46,17	46,19
MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,15
MnO	0,42	0,26	0,26	0,31	0,47	0,59	0,56	0,51	0,53	0,36	0,44
V ₂ O ₃	0,44	0,30	0,19	0,19	0,23	0,12	0,14	0,18	0,54	0,46	0,31
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0,46	0,70	0,36	0,46	0,61	0,11	0,52	0,29
Сумма	99,87	99,98	99,97	99,92	99,87	99,99	99,99	99,98	99,80	99,88	99,89

Табл. 5а. Химический состав (мас.%) выделений ильменита в базальтах реголита станции Луна-16

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Средн.
TiO ₂	52,74	51,69	52,76	52,62	52,78	52,61	52,67	52,90	52,63	52,65	52,71
FeO	45,82	46,82	46,02	46,62	46,43	46,52	46,43	45,02	46,62	46,63	46,19
MgO	0,76	0,79	0,65	0,24	0,41	0,36	0,41	1,27	0,24	0,28	0,54
MnO	0,32	0,27	0,29	0,32	0,34	0,26	0,34	0,32	0,32	0,26	0,30
Cr ₂ O ₃	0,29	0,29	0,26	0,14	0,12	0,18	0,12	0,46	0,14	0,13	0,21
Сумма	99,92	99,86	99,97	99,94	99,96	99,93	99,97	99,97	99,95	99,95	99,95

Табл. 5б. Химический состав (мас.%) выделений ильменита в базальтах реголита станции Луна-24. Анализы ильменита выполнены на приборе JSM-5610LV, аналитик – Л.О. Магазина.

Оксиды	Луна-24										Луна-20				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cr ₂ O ₃	43,56	41,50	41,50	44,01	42,72	40,83	45,04	44,90	43,33	40,90	41,21	44,76	41,13	41,71	43,68
Al ₂ O ₃	14,47	16,64	15,12	17,10	13,12	15,64	17,64	17,68	17,09	11,35	12,95	10,67	18,93	16,76	15,29
TiO ₂	2,09	2,18	2,40	1,22	3,14	2,75	1,27	1,24	1,28	6,59	4,69	2,02	1,39	1,58	2,30
V ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,68	0,59	1,19	0,87
FeO _{обр}	6,54	6,95	6,89	5,27	6,86	6,86	4,52	4,51	5,51	7,06	7,85	11,39	5,24	5,78	5,08
FeO	30,29	27,80	32,16	27,25	32,56	31,27	24,61	25,00	28,38	30,93	29,27	23,58	27,03	28,58	27,86
MnO	0,14	0,20	0,12	0,14	0,10	0,16	0,08	0,11	0,11	0,17	0,13	0,00	0,41	0,39	0,29
MgO	2,91	4,73	1,82	5,01	1,51	2,50	6,84	6,56	4,30	2,99	3,91	6,90	5,00	3,89	4,27
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,72	99,88	99,64
Cr ³⁺	9,251	8,614	8,834	9,163	9,142	8,607	9,232	9,222	9,065	8,490	8,573	9,434	8,493	8,758	9,148
Al ³⁺	4,580	5,147	4,797	5,305	4,183	4,913	5,389	5,411	5,327	3,512	4,015	3,351	5,825	5,244	4,772
Ti ⁴⁺	0,845	0,863	0,971	0,485	1,277	1,102	0,494	0,483	0,509	2,602	1,857	0,808	0,547	0,632	0,914
V ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,120	0,101	0,209	0,152
Fe ²⁺ _{обр}	1,323	1,374	1,396	1,045	1,397	1,376	0,882	0,881	1,097	1,395	1,554	2,285	1,031	1,156	1,012
Fe ²⁺	6,804	6,105	7,242	6,002	7,369	6,972	5,336	5,432	6,278	6,791	6,440	5,258	5,905	6,347	6,172
Mn ²⁺	0,031	0,044	0,027	0,030	0,023	0,035	0,018	0,025	0,025	0,038	0,028	0,000	0,090	0,088	0,064
Mg ²⁺	1,165	1,852	0,731	1,968	0,609	0,993	2,646	2,543	1,697	1,171	1,532	2,742	1,946	1,539	1,687
Подвид	Субтитаноалюмохромит										Субтитаносуб- алюмохромит		Субтитано- алюмохромит		

Табл. 6. Химический состав (мас.%) и кристаллохимические коэффициенты лунных хромитинелидов. Химический состав лунных хромитинелидов пересчитан с учетом обращенности кристаллической решетки и вхождения части двухвалентного железа в октаэдрические позиции. Точность анализа соответствует стандартам – 0,01 абс.%, сумма определяемых компонентов не хуже 99%. В части образцов содержание ванадия в хромитинелидах не определялось, поэтому в таблице стоит прочерк. Анализы хромитинелидов выполнены на приборе JEOL JXA-8200, аналитик – А.А. Вирюс.

– Ильменит (табл. 5) наиболее распространен в базальтах лунных морей.

– Хромистая ульвошпинель и субтитаноалюмохромит, наоборот, наиболее распространены в континентальной части Луны.

– В базальтах лунных морей наибольшим распространением пользуются сульфиды железа – троилит и пирротин.

Обнаруженные ранее сотрудниками Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Мохов и др., 2007) на поверхности частиц лунного реголита пленочные микровыделения нескольких видов самородных металлов (в том числе, металлов группы железа) и их экзотические сплавы совпадают по составу с сингенетичными пленками самородных металлов (Макеев, Криулина, 2012) на мантийных алмазах

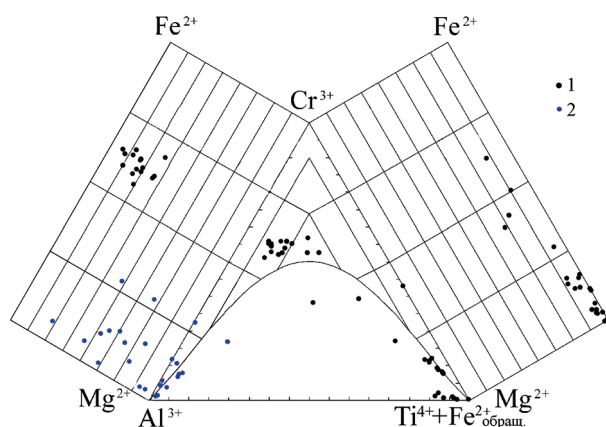


Рис. 7. Диаграмма состава лунных хромшпинелидов. 1 – Луна-24 (табл. 6); 2 – глиноземистые хромшпинелиды и розовые шпинели, пересчет анализов (Frondel, 1978).

из нескольких месторождений России и Мира. Все это может свидетельствовать о восстановительной среде минералообразования.

Заключение. Мотивацией для более подробного исследования спутника Земли служит наличие лунных минеральных ресурсов, поэтому в преддверии новых пилотируемых полетов на Луну следует сделать предположение о наиболее вероятных находках видов приповерхностных месторождений полезных ископаемых по аналогии с распространением полезных ископаемых в земных породах. Наиболее вероятны находки титановых проявлений в виде ильменита в базальтах и оливиновых базальтах лунных морей; хромовых и железных руд в анортозитовых лополитах (аналогичных Бушвелду) и в породах «Mg-suite» (Prissel et al., 2014) с возможной самородной Pt-Pd и Pt-Fe минерализацией. Так как обширные площади лунных морей покрыты излияниями базальтов, очень похожими на сибирские траппы, то они могут быть специализированы на вкрапленные медно-никелевые сульфидные руды (Криволуцкая, Брянчанинова, 2011). В лунных мантийных породах (дунитах, лерцолитах) на обратной стороне могут присутствовать алмазы. При этом нужно заметить, что геодинамические истории Земли и Луны коренным образом отличаются, соответственно, закономерности образования и размещения полезных ископаемых также будут существенно отличаться.

Благодарность

Авторы благодарны А.А. Вирюс и Л.О. Магазиной за помощь в аналитических исследованиях и рецензентам за полезное обсуждение материала.

Литература

- Барсуков В.Л. (1977). Предварительные данные по керну реголита, доставленному на Землю автоматической лунной станцией «Луна-24». *Мат. 8-ой лунной науч. конф.*, с. 3303–3318.
- Богатиков О.А. (1979). Анортозиты. М.: Наука, 232 с.
- Богатиков О.А., Макеев А.Б. (2012). Особенности минералогии лунного реголита, Луна-24. *Мат. 13 межд. конф.: Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*. М., с. 39–42.
- Грунт из материкового района Луны (1979). М.: Наука, 708 с.
- Лунный грунт из моря Кризисов (1980). М.: Наука, 360 с.
- Криволуцкая Н.А., Брянчанинова Н.И. (2010). Оливины магматических пород. *Российский химический журнал*, 54(2), с. 50–61. <https://doi.org/10.1134/S1070363211060363>
- Магматизм Земли и Луны: Опыт сравнительного анализа (1990). М.: Наука, 211 с.

Макеев А.Б. (2013). Лунные хромшпинелиды из реголита станций Луна-16, -20, -24. *Мат. минералогического семинара: Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Южские чтения-2013)*. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, с. 97–99.

Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. (1999). Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб.: Наука, 252 с.

Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. (2012). Минеральный состав базальтов Вольско-Вымской гряды (Средний Тиман). *Мат. минералогического семинара: Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества*. Сыктывкар: Геопринт, с. 281–283.

Макеев А.Б., Криулина Г.Ю. (2012). Металлические пленки на поверхности и в объеме кристаллов алмаза Архангельской и Якутской алмазных провинций. *ЗРМО*, 1, с. 101–114. <https://doi.org/10.1134/S1075701512080107>

Макеев А.Б., Лютоев В.П., Второв И.П., Брянчанинова Н.И., Макавецкас А.Р. (2020). Состав и спектроскопия ксенокристов оливины из гавайских толеитовых базальтов. *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*, 162(2), с. 253–273. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.253-273>

Малышева Т.В. (1980). ЯГР-спектроскопия образцов реголита из моря Кризисов. Лунный грунт из моря Кризисов. М.: Наука, с. 300–308.

Мохов А.В., Карташов П.М., Богатиков О.А. (2007). Луна под микроскопом: новые данные по минералогии Луны: атлас. М.: Наука, 127 с.

Хаггерти С.Э. (1979). «Луна-20»: химия минералов – шпинель, пленаст, хромит, ульвошпинель, ильменит и рутил. Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, с. 267–277.

Хисина Н.Р. (1987). Субсолидусные превращения твердых растворов порообразующих минералов. М.: Наука, 207 с.

Фрондел Дж. (1978). Минералогия Луны. М.: Мир, 333 с.

Bell P.M., Mao H.K., Hazen R.M. and Mao A.L. (1978). Luna 24 sample from Mare Crisium: New structural features in lunar glasses from the study of crystal-field spectra. In: *Mare Crisium: The view from Luna 24*. Eds. Merrill R.B. and Papike J.J. N.Y.: Pergamon Press, pp. 265–280.

Khisiina N.R., Makarov E.S. (1977). Cation distribution and exsolution in the Luna-20 pyroxenes as the chronological indicator of their thermal history. *Earth, Moon, and Planets*, 17(2), pp. 149–165. <https://doi.org/10.1007/BF00640905>

Khisiina N.R., Wirth R., Abart R., Rhede D. and Heinrich W. (2013). Oriented chromite-diopside symplectic inclusions in olivine from lunar regolith delivered by «Luna-24». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104, pp. 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.050>

Makeyev A.B. (2006). Typomorphic features of Cr-spinels and mineralogical prospecting guides for Cr ore mineralization. *Russian Journal of Earth Sciences*, 8(3), pp. 1–19. <http://dx.doi.org/10.2205/2006ES000196>

Prissel T.C., Parman S.W., Jackson C.R.M., et al. (2014). Pink Moon: The petrogenesis of pink spinel anorthosites and implications concerning Mg-suite magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 403, pp. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.027>

Saal A.E., Haur E.H., Lo Cascio M., Van Orman J.A., Rutherford M.J. and Cooper R.F. (2008). The Volatile Content of the Lunar Volcanic Glasses: Evidence for the Presence of Water in the Moon's Interior. *Nature*, 454, pp. 192–195. <https://doi.org/10.1038/nature07047>

Taylor G.J., Warner R.D. and Keil K. (1978). VLT mare basalts: Impact mixing, parent magma types, and petrogenesis. In: *Mare Crisium: The view from Luna 24*. Eds. Merrill R.B. and Papike J.J. Pp. 357–370.

The Moon – A new appraisal from space missions and laboratory analyses (1977). London: The Royal Society, 606 p.

Сведения об авторах

Александр Борисович Макеев – доктор геол.-мин. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Лаборатории геологии рудных месторождений, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35
e-mail: abmakeev@igem.ru

Наталья Игоревна Брянчанинова – доктор геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник, Геологический институт РАН

Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, д. 7, стр.1

Статья поступила в редакцию 22.01.2021;

Принята к публикации 12.03.2021; Опубликована 30.03.2021

Typomorphism of rock-forming minerals of Lunar regolith, Luna-16, -20, -24: comparison of sea vs continent vs sea

A.B. Makeyev^{1*}, N.I. Bryanchaninova²

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Alexander B. Makeev, e-mail: abmakeev@mail.ru

Abstract. The study focuses on the comparison of the chemical and mineral composition of Lunar regolith probes from Luna-16, -20, -24 stations and their the sea-continent environments. Using microprobe JXA-8200 and JSM-5610LV (400 analyses, 50 images, 9 fragments of layer-by-layer core samples) 18 mineral phases and their 12 varieties were diagnosed. The most common are iron-magnesium and calcium-bearing varieties of silicates – anorthite, clinopyroxenes and olivine. The typomorphic features of rock-forming minerals in two types of the lunar surface are discussed. The composition of chromespinelids is demonstrated on a triangular prism diagram.

Key words: Moon, Soviet automatic stations, Lunar regolith, Mare Fecunditatis, sea of Crises, anorthite, clinopyroxen, olivine, ilmenite, olivine gabbro

Recommended citation: Makeyev A.B., Bryanchaninova N.I. (2021). Typomorphism of rock-forming minerals of Lunar regolith, Luna-16, -20, -24: comparison of sea vs continent vs sea. *Georesursy = Georesources*, 23(1), pp. 94–105. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.10>

Acknowledgments

The authors are grateful to A.A. Viryus and L.O. Magasina for their help in analytical research and to the reviewers for helpful discussion of the work.

References

- Barsukov V.L. (1977). Preliminary data for the regolith core brought to Earth by the automatic lunar station Luna 24. *Proc. 8th Moon Sci. Conf.*, pp. 3303–3318. (In Russ.)
- Bell P.M., Mao H.K., Hazen R.M. and Mao A.L. (1978). Luna 24 sample from Mare Crisium: New structural features in lunar glasses from the study of crystal-field spectra. In: *Mare Crisium: The view from Luna 24*. Eds. Merrill R.B. and Papike J.J. N.Y.: Pergamon Press, pp. 265–280.
- Bogatikov O.A. (1979). Anortozity [Anorthosites]. Moscow: Nauka, 232 p. (In Russ.)
- Bogatikov O.A., Makeyev A.B. (2012). Features of the Mineralogy of the Lunar regolith, Luna-24. *Proc. 13 Int. Conf.: Physical-chemical and petrophysical research in Earth Sciences*. Moscow, pp. 39–42. (In Russ.)
- Fronde J.W. (1978). Mineralogiya Luny [Lunar Mineralogy]. Moscow: Mir, 333 pp. (In Russ.)
- Haggerty S.E. (1979). Moon-20: chemistry of minerals – spinel, pleonast, chromite, ulvöspinel, ilmenite and rutile. Soil from the mainland region of the moon. Moscow: Nauka, pp. 267–277. (In Russ.)
- Khisina N.R. (1987). Subsolidus transformations of solid solutions of rock-forming minerals. Moscow: Nauka. 207 pp. (In Russ.)
- Khisina N.R., Makarov E.S. (1977). Cation distribution and exsolution in the Luna-20 pyroxenes as the chronological indicator of their thermal history. *Earth, Moon, and Planets*, 17(2), pp. 149–165. <https://doi.org/10.1007/BF00640905>
- Khisina N.R., Wirth R., Abart R., Rhede D., Heinrich W. (2013). Oriented chromite-diopside symplectic inclusions in olivine from lunar regolith delivered by “Luna-24”. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104, pp. 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.050>
- Krivolutskaya N.A., Bryanchaninova N.I. (2011). Olivines of Igneous Rocks. *Russian Journal of General Chemistry*, 81(6), pp. 1302–1314. <https://doi.org/10.1134/S1070363211060363>
- Lunar soil from Mare Crisium [Lunnyi grunt iz morya Krizisov]. (1980). Moscow: Nauka, 360 pp. (In Russ.)
- Magmatism of the Earth and the Moon: Experience of comparative analysis [Magmatizm Zemli i Luny: opyt sravnitel'nogo analiza]. (1990). Moscow: Nauka, 211 pp. (In Russ.)
- Makeyev A.B. (2006). Typomorphic features of Cr-spinels and mineralogical prospecting guides for Cr ore mineralization. *Russian Journal of Earth Sciences*, 8(3), pp. 1–19. <http://dx.doi.org/10.2205/2006ES000196>
- Makeyev A.B. (2013). Lunar chromespinelids from the regolith of Luna-16, -20, -24. *Modern problems of theoretical, experimental and applied Mineralogy (Yushkin readings–2013): Proc. Mineralogical Seminar*. Syktyvkar: Institute of Geology, Komi science center UB RAS, pp. 97–99. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Bryanchaninova N.I. (1999). Topomineralogiya ultrabazitov Polynarnogo Urala [Typomineralogy of Ultrabasites of the Polar Urals]. St. Petersburg: Nauka, 252 p. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Bryanchaninova N.I. (2012). Mineral composition of basalts of the Volsko–Vymskaya ridge (Middle Timan). *Crystalline and solid non-crystalline state of mineral matter: Proc. Mineralogical Seminar*. Syktyvkar: Geoprint, pp. 281–283. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Kriulina G.Yu. (2012). Metal Films on the Surface and within Diamond Crystals from Arhangelskaya and Yakutian Diamond Provinces. *Geology of Ore Deposits*, 54(8), pp. 663–673. <https://doi.org/10.1134/S1075701512080107>
- Makeyev A.B., Lutoev V.P., Vtorov I.P., Bryanchaninova N.I., Makavetskaya A.R. (2020). Composition and spectroscopy of olivine xenocrysts from the Hawaiian tholeiitic basalts. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 162(2), pp. 253–273. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.253-273> (In Russ.)
- Malysheva T.V. (1980). NGR-spectroscopy of regolith samples from Mare Crisium. *Lunar soil from Mare Crisium*. Moscow: Nauka, pp. 300–308. (In Russ.)
- Mokhov A.V., Kartashov P.M., Bogatikov O.A. (2007). Luna pod mikroskopom: novye dannye po mineralogii Luny: Atlas [The Moon under the microscope: new data on the moon's Mineralogy: Atlas]. Moscow: Nauka, 127 pp. (In Russ.)
- Regolith from the highland region of the Moon [Grunt iz materikovogo raiona Luny]. (1979). Moscow: Nauka, 708 pp. (In Russ.)
- Prissel T.C., Parman S.W., Jackson C.R.M., et al. (2014). Pink Moon: The petrogenesis of pink spinel anorthosites and implications concerning Mg-suite magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 403, pp. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.027>
- Saal A.E., Haur E.H., Lo Cascio M., Van Orman J.A., Rutherford M.J. and Cooper R.F. (2008). The Volatile Content of the Lunar Volcanic Glasses: Evidence for the Presence of Water in the Moon's Interior. *Nature*, 454, pp. 192–195. <https://doi.org/10.1038/nature07047>
- Taylor G.J., Warner R.D. and Keil K. (1978). VLT mare basalts: Impact mixing, parent magma types, and petrogenesis. In: *Mare Crisium: The view from Luna 24*. Eds. Merrill R.B. and Papike J.J. Pp. 357–370.
- The Moon – A new appraisal from space missions and laboratory analyses (1977). London: The Royal Society, 606 p.

About the Authors

Alexander B. Makeyev – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Leading Researcher, Laboratory of Ore Deposits Geology, Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences
35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation
e-mail: abmakeev@igem.ru

Nataliya I. Bryanchaninova – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher
Geological Institute of the Russian Academy of Sciences
7, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation

Manuscript received 22 January 2021;

Accepted 12 March 2021;

Published 30 March 2021